

Aus dem Institut für Umweltingenieurwesen
der Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Bodenverfestigungen mit Kalk-Hüttensand-Gemischen

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades
Doktor Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
der Universität Rostock

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Elmar Wisotzki, geb. am 09.03.1973 in Waren/Müritz
wohnhaft in Rostock

Rostock, 08. Mai 2008

urn:nbn:de:gbv:28-diss2009-0054-6

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff

Institut für Umweltingenieurwesen

Universität Rostock

em. Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Vala

Institut für Bauingenieurwesen

Universität Rostock

Prof. Dr.-Ing. Lutz Wichter

Lehrstuhl Bodenmechanik und Grundbau / Geotechnik

Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Tag der öffentlichen Verteidigung: 07. Januar 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Technischer Stand	3
2.1	Systematik der Bodenverbesserung	3
2.2	Bodenbehandlungen mit Bindemitteln	4
2.2.1	Bodenverbesserungen	6
2.2.2	Bodenverfestigungen	7
2.3	Bauverfahren	7
2.3.1	Zentralmischverfahren (mixed-in-plant)	7
2.3.2	Baumischverfahren (mixed-in-place)	8
2.4	Prüfungen bei Bodenbehandlungen	10
3	Versuchsprogramm	11
3.1	Einbautechnologie	11
3.2	Lagerungsbedingungen	11
3.3	Kalkanteil	12
3.4	Zumahlstoffe	12
4	Ausgangsstoffe	13
4.1	Tone	13
4.1.1	Aufbau von Tonmineralen	13
4.1.2	Eigenschaften von Tonmineralen	15
4.2	Kalk	19
4.3	Hüttensand	23

5	Verfestigungsmechanismen	25
5.1	Erdstoff-Kalk-Reaktionen	25
5.1.1	Sofortreaktionen	25
5.1.2	Langzeitreaktionen	27
5.1.2.1	Hydraulische Erhärtung	27
5.1.2.2	Carbonatische Erhärtung	28
5.2	Hüttensand-Kalk-Reaktionen	28
6	Experimentelle Untersuchungen	31
6.1	Probekörper	31
6.1.1	Überblick - Herstellung der Probekörper	31
6.1.2	Lagern der Probekörper	34
6.1.3	Einaxiale Druckversuche	34
6.1.4	Frostbeanspruchung	36
6.1.5	Modifiziertes Herstellen der Probekörper	39
6.1.6	Vergleich der Verfahren	41
6.2	Erdstoff-Bindemittel-Gemische	44
6.2.1	Erdstoff	44
6.2.1.1	Kenngößen	44
6.2.1.2	Wasseraufnahmevermögen	47
6.2.1.3	Mineralogie des Erdstoffs	48
6.2.1.4	Proctorversuch bei Standardverdichtung	48
6.2.1.5	Proctorversuch bei doppelter Standardverdichtung	51
6.2.2	Erdstoff-Kalk-Gemisch	55
6.2.2.1	Proctorversuch bei Standardverdichtung	57
6.2.2.2	Proctorversuch bei doppelter Standardverdichtung	59
6.2.3	Gemischkombinationen	61
6.3	Erdstoff-Kalk-Hüttensand-Gemische	65
6.3.1	Proctorversuche	67
6.3.2	Einaxiale Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer und den klimatischen Bedingungen	71
6.3.2.1	Probekörperherstellung	71
6.3.2.2	Einaxiale Druckfestigkeiten der Serie 1 und 2	73
6.3.2.3	Einaxiale Druckfestigkeiten der Serien 3 und 4	77
6.3.2.4	Einaxiale Druckfestigkeiten der Serie 5	83
6.3.3	Konsistenzgrenzen	85

7 Auswertung	89
7.1 Definierte Baustoffrezepturen	90
7.2 Thermische Analyse	92
7.2.1 Grundlagen	92
7.2.2 Untersuchung der Einzelkomponenten	94
7.2.3 Untersuchung von Gemischkombinationen	96
7.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	100
7.4 Röntgendiffraktometrie	102
7.4.1 Grundlagen	102
7.4.2 Untersuchungen	103
Zusammenfassung	107
Literaturverzeichnis	109
Tabellenverzeichnis	115
Bildverzeichnis	117

Abstract

The increasing traffic capacity of transport routes due to the rising traffic volume and axle loads of the freight transportation define increased requirements to the subsoil and formation of road construction. To meet these demands it is necessary that the existing procedures and methods of the stabilisation of soil are subject to continuous enhancement.

While hydraulic-bonded base layer made of concrete-stabilized incohesive soil predominantly show sufficient stabilities, lime-treated cohesive soil form considerably less stability. In spite of the partly achieved improvements of the stability characteristics, these have not been satisfying in a sufficient extend and partly vary extremely regarding the quality.

The increase of the strain-hardening effects in cohesive soil is consequently still a challenge.

The objective of the present work is to achieve an efficiency increase of the existing lime stabilisation methods especially for distinctively plastic, fine-grained soil by adding of additives. Soil-lime-slag sand mixtures with varying proportion were tested and the influence on the intensity of compaction regarding the stability characteristics of this mix was investigated.

Practical conditions are simulated by keeping them in the laboratory climate, in the water and by freeze-thaw-changes. Additionally, pressure compaction methods for the test piece production are used which comprises the assembly in-situ much better.

The considerable improvements of the soil by the use of granulated slag powder-lime-mixture are attributed to reactions of structures which are stability-producing. Besides spontaneous reactions between lime and the latent-hydraulic acting granulated slag, the capacity of reaction is increased compared to the lime due to the attachment of elements of incohesive granulated slag to the contact surface of clay materials.

Thus, the formation of stability increasing CSH-gels, CAH-gels and the crystal reformation is supported which were proved with thermo-analytic, spectroscopic and scanning electron-microscopic investigations.

Kapitel 1

Einleitung und Zielsetzung

Seit jeher ist die natürliche Erdoberfläche der Baugrund für menschliche Siedlungen sowie für Verbindungswege und Straßen. Die Wegeführungen sowie die Auswahl eines Siedlungsstandortes richtete sich unter anderem nach der Qualität des Untergrundes. Weiche, nicht tragfähige Böden wurden gemieden bzw. nur notgedrungen genutzt.

Schon in der Frühzeit wurden Maßnahmen ergriffen, nicht genügend tragfähige oder zu stark kompressible Bodenschichten in ihren Eigenschaften zu verbessern, d.h. Bodenverbesserungen vorzunehmen. Mit der Entwicklung leistungsfähiger Technologien und Verfahren sowie wachsender Baugrundknappheit sind Baugrundverbesserungen mehr oder weniger fester Bestandteil des heutigen Erdbaus. Der Einsatz von Tiefendrains, Recycling-Materialien in Tragschichten oder mit Kalk stabilisierte Erdsäulen sind nur einige der häufig angewandten Methoden.

Im Verkehrswegebau sind oft großflächige, oberflächennahe Verbesserungen des Untergrundes erforderlich. Frostempfindliche, schlecht einbaufähige Erdstoffe mit minderen Trageigenschaften werden meist direkt vor Ort verbessert, da hierdurch kostenintensive Transporte sowie die Deponierung dieser Erdstoffe entfallen. Nichtbindige Erdstoffe können hierbei durch Zementzugabe, in Anlehnung an die Betontechnologie, zu hydraulisch gebundenen Tragschichten ausgebildet werden. In gemischkörnigen Böden mit mäßig bindigen Anteilen werden zunehmend Mischbindemittel getestet und verwendet [50]. Der Einsatz von Zementen in sehr feinkörnigen Erdstoffen ist jedoch unwirksam. Eine der gängigen Methode zur Verfestigung dieser bindigen Erdstoffe stellt die Kalkstabilisierung dar. Der Erfolg einer solchen Maßnahme ist weitgehend abhängig von der Puzzolanität der Tonminerale. Die Wirksamkeit einer Bodenverbesserung ist daher jeweils in Eignungsprüfungen nachzuweisen.

Die Verbesserung von bautechnisch relevanten Bodeneigenschaften durch Kalkzugabe ist hinlänglich bekannt und wurde seit etwa 1960 wissenschaftlich untersucht. Mit Rasterelektronenmikroskopaufnahmen an Schliffen von verfestigten Erdstoffproben konnte *Brand* [3] 1962 erstmals den Nachweis der Reaktionen zwischen Kalk und Tonmineralen zu auskristallisierenden Gelen erbringen. Durch die alkalische Anregung des Calciumhydroxids können aus den aluminosilikatischen Bestandteilen des Tones silikatische und aluminatische Monomere gelöst werden, die in puzzolanischen Reaktionen mit dem Portlandit langfristig zu CSH- und CAH-Phasen reagieren.

Um einem bindigen Erdstoff erhöhte Festigkeitseigenschaften zu verleihen, werden diesem neben Kalk auch künstliche Puzzolane beigemischt. Hierzu zählen unter anderem Steinkohleflugaschen, Braunkohlenfilterasche oder Ziegelmehl. Der tatsächliche Verbesserungseffekt hängt jedoch stark von der Menge der reaktionsfähigen Phasen und der Zusammensetzung dieser Stoffe ab. Bei sulfatischen und humosen Bestandteilen von Braunkohlenfilteraschen konnten in der Vergangenheit entfestigende Treiberscheinungen beobachtet werden [28].

Die zunehmende Belastung der Verkehrswege infolge gestiegenem Verkehrsaufkommen und Achslasten beim Güterverkehr stellen erhöhte Anforderungen an den Untergrund und Unterbau von Verkehrswegen. Um diesen Ansprüchen zu genügen, ist es notwendig die bestehenden Verfahren der Stabilisierung von Erdstoffen weiterzuentwickeln. Während hydraulisch gebundene Tragschichten aus zementstabilisierten körnigen Erdstoffen überwiegend ausreichende Festigkeiten aufweisen, bilden kalkbehandelte bindige Erdstoffe nur wesentlich geringere Festigkeiten aus. Trotz teilweise erzielten Verbesserungen der Festigkeitseigenschaften sind diese noch nicht in ausreichendem Maße zufriedenstellend und unterliegen zum Teil starken Qualitätsschwankungen. Die Steigerung der Verfestigungseffekte in bindigen Böden stellt somit nach wie vor eine Herausforderung dar.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, speziell für ausgeprägt plastische, feinkörnige Erdstoffe eine Effizienzerhöhung der bestehenden Kalkstabilisierungsmethode durch Zugabe von Zusatzstoffen zu erreichen. Hierzu wurden Erdstoff-Kalk-Hüttensandgemische mit variierenden Mengenteilen erprobt und der Einfluss der Verdichtungsintensität auf die Festigkeitseigenschaften dieser Kombinationen untersucht.

In der Arbeit werden, ausgehend von den Kenntnissen über die Eigenschaften der Einzelkomponenten, die möglichen chemischen und physikalischen Reaktionsmechanismen dieser Stoffe untereinander dargestellt und in bodenmechanischen Versuchen belegt. Hierbei richtet sich das Interesse besonders auf

- die zeit- und gemischabhängige Festigkeitsentwicklung,
- die Frostsicherheit,
- die Veränderung der Plastizität sowie
- auf die Verarbeitbarkeit dieser Erdstoff-Kalk-Hüttensandgemische.

Zur realistischen Vergleichbarkeit der bodenmechanischen Eigenschaften zwischen Labor und Baustelle wird dann ein praxisnahes Versuchsprogramm eingeführt, das einerseits die in situ-Verdichtungsmethoden bei der Probekörperherstellung simuliert und andererseits unterschiedliche klimatische Lagerungsverhältnisse beinhaltet.

Abschließend werden die Ursachen der erhöhten Festigkeitsteigerungen gegenüber Kalkstabilisierungen ohne Zusätze diskutiert und mit verschiedenen Nachweismethoden Neubildungen von CSH- und CAH-Phasen dargestellt.

Kapitel 2

Technischer Stand der Bodenverbesserungsverfahren

2.1 Systematik der Bodenverbesserung

Baugrundverbesserungen werden nach Bild 2.1 in die drei Hauptkategorien Verdichtung, Bodenverfestigung und Bodenaustausch eingeteilt. Die Verfahren beruhen im Wesentlichen auf einer Erhöhung der Scher- und der Druckfestigkeit der zu verbessernden Bodenschicht, sofern der anstehende Erdstoff hierfür geeignet ist.

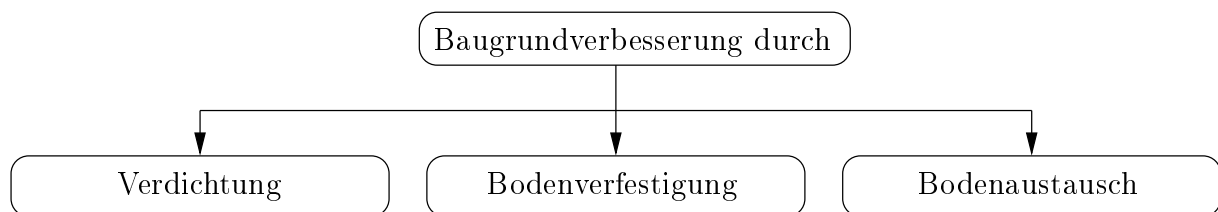


Bild 2.1: Einteilung der Baugrundverbesserungen

Nach Auswahl einer geeigneten Maßnahme zur Baugrundverbesserung sind die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit, die sich aus den Nachweisen der Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ergeben, zu ermitteln. Die wesentlichen Forderungen bei Baugrundverbesserungen [37] sind:

- Erhöhung der Dichte und Scherfestigkeit (Stabilitätserhöhung)
- Verringerung der Zusammendrückbarkeit (Verformungsverringerung)
- Beeinflussung der Wasserdurchlässigkeit zur
 - Verminderung des Wasserandrangs/-abflusses
 - Erhöhung der Konsolidationsgeschwindigkeit (Verformungsbeschleunigung)
- Vergrößerung der Homogenität des Baugrundes

Die in Betracht kommenden Verfahren sind in Bild 2.2 aufgeführt.

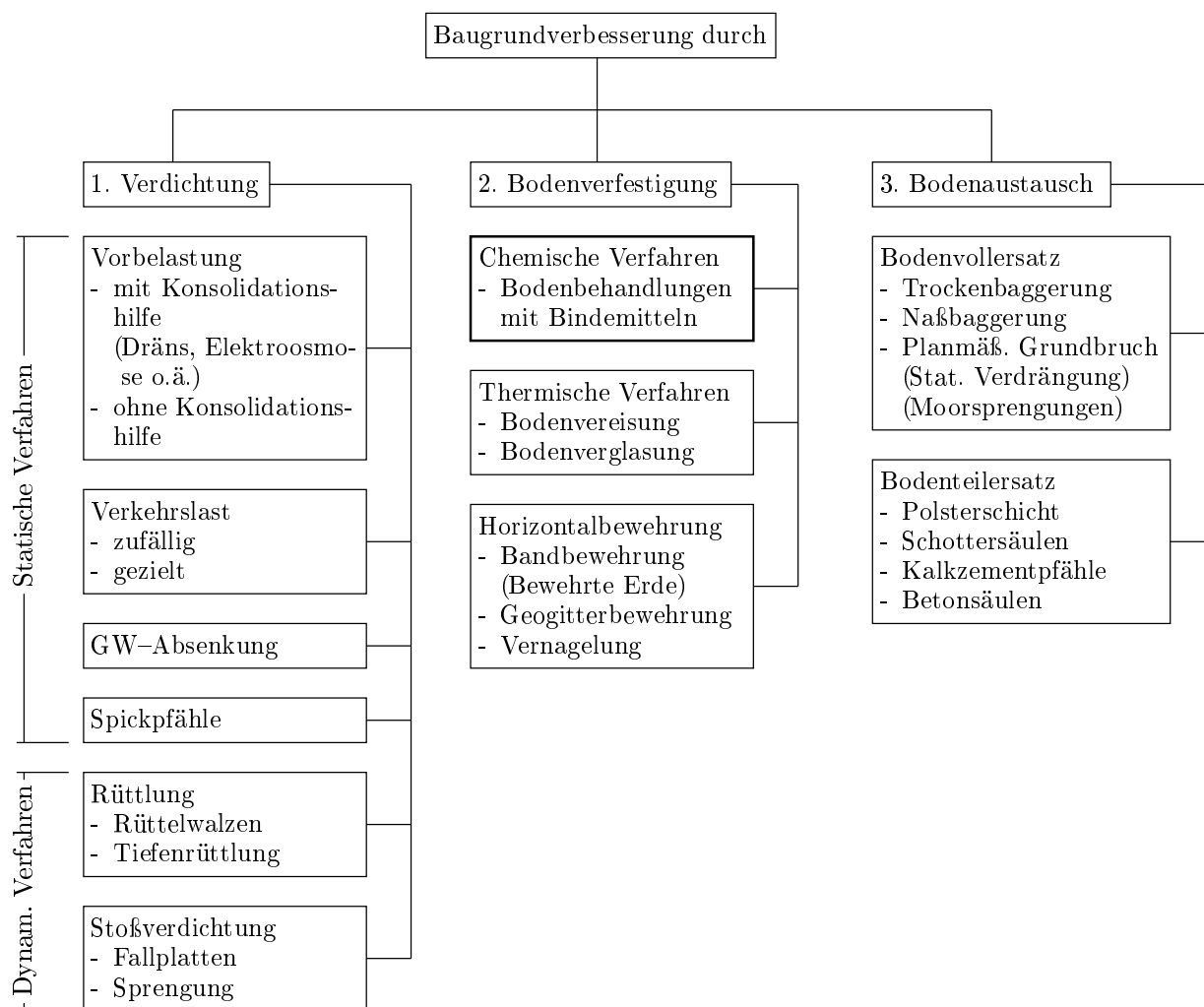


Bild 2.2: Systematik der Baugrundverbesserungen nach [55]

Im Hinblick auf Baugrundverbesserungen besteht auch heute noch ein großer Forschungsbedarf, da sich insbesondere bei der Behandlung von großen Volumina die Frage stellt, ob hierfür recycelbare Baustoffe und Industrienebenprodukte geeignet sind, aber auch Langzeiterfahrungen erst erfasst sowie ausgewertet werden müssen [38].

2.2 Bodenbehandlungen mit Bindemitteln

Bereits in der Antike wurden Bodenbehandlungen mit Bindemitteln zur Verfestigung von Erdstoffen im Wege- und Straßenbau genutzt. Diese Methoden gerieten jedoch in Vergessenheit und wurden erst wieder in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts aufgegriffen [67].

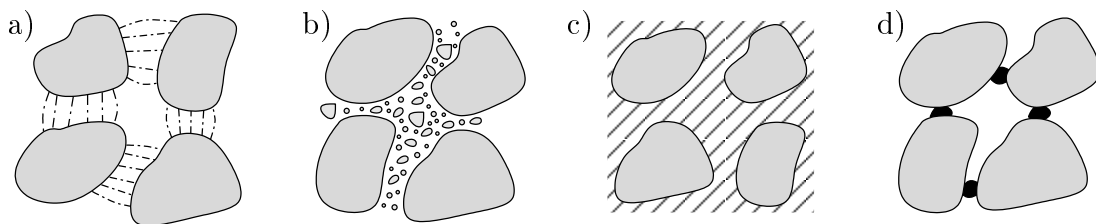
In der Neuzeit wurden die chemischen Verfahren der Bodenverfestigung hauptsächlich und nahezu parallel in den USA und Deutschland entwickelt. Während in den USA nach einer ökonomisch günstigen Methode für den Wege- und Straßenbau dünn besiedelter,

weitläufiger Gebiete gesucht wurde, konzentrierte sich die Entwicklung in Deutschland auf wenig aufwendige Verfahren zur Befestigung von Feldflugplätzen für die damalige Luftwaffe. Mit dieser Zielsetzung sind ab Sommer 1937 von der Luftwaffenbauverwaltung Verfahren erprobt worden, die den schnellen Bau von Startbahnen für schwere Flugzeuge erlaubten. Dabei wurde erstmals die Möglichkeit der Verfestigung bindiger Erdstoffe mit Zement nachgewiesen [52].

Heute zählen Bodenbehandlungen mit Bindemitteln zur gängigen Baupraxis. Insbesondere im Straßenbau finden hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) Verwendung. Der Einsatz von Boden-Bindemittel-Gemischen ist zunehmend auch außerhalb des reinen Straßenbaus, bspw. bei verwitterungsempfindlichen Böschungen, Industrieflächen oder Fundamentplatten, zu beobachten.

Hauptziel der Bodenbehandlung ist es, die Eigenschaften von nicht tragfähigen Böden so zu verbessern, dass sie weit gehend resistent gegenüber den Wechselwirkungen mit Wasser werden. Entspricht der Wassergehalt eines feinkörnigen Erdstoffs etwa dem des adhäsiv gebundenen Wassers, sind die Kohäsionskräfte zwischen den einzelnen Partikeln und damit ihr Zusammenhalt optimal ausgeprägt. Mit steigendem Wassergehalt nimmt sowohl die Kohäsion, meist verbunden mit einer Volumenvergrößerung, als auch die Tragfähigkeit ab. Periodisch folgende Austrocknungen verbunden mit Schrumpfungen und erneute Durchfeuchtungen mit Schwellungen führen zur Zerstörung der Erdstoffstruktur. Stabilisierungsmaßnahmen beinhalten daher Veränderungen der Erdstoffstruktur, die mit Bindemitteln (Kalk, Zement, Bitumen) oder sonstigen Chemikalien günstiger gestaltet werden soll.

Die für die Stabilisierung wichtigsten chemischen Reaktionen stellen der Ionenaustausch, die Niederschlagsbildung, die Polymerisation und die Oxidation dar [36]. In Bild 2.3 sind die möglichen Mechanismen der Kornbindung bei chemischen Stabilisierungsverfahren dargestellt.



- a) die Haftfestigkeit entsteht durch die Oberflächenkräfte zwischen den Festkörnern
- b) die Poren zwischen den Körnern werden durch ein inertes Material verfüllt
- c) die Festteilchen sind in eine kontinuierliche Matrix eingebettet
- d) die Festigkeit wird durch „Punktschweißung“ erzeugt

Bild 2.3: Verbindung der Festkörner bei den verschiedenen Stabilisierungen [36]

In Bild 2.4 sind die wirksamen Anwendungsbereiche für die anorganischen Bindemittel Kalk und Zement bei Bodenbehandlungen dargestellt.

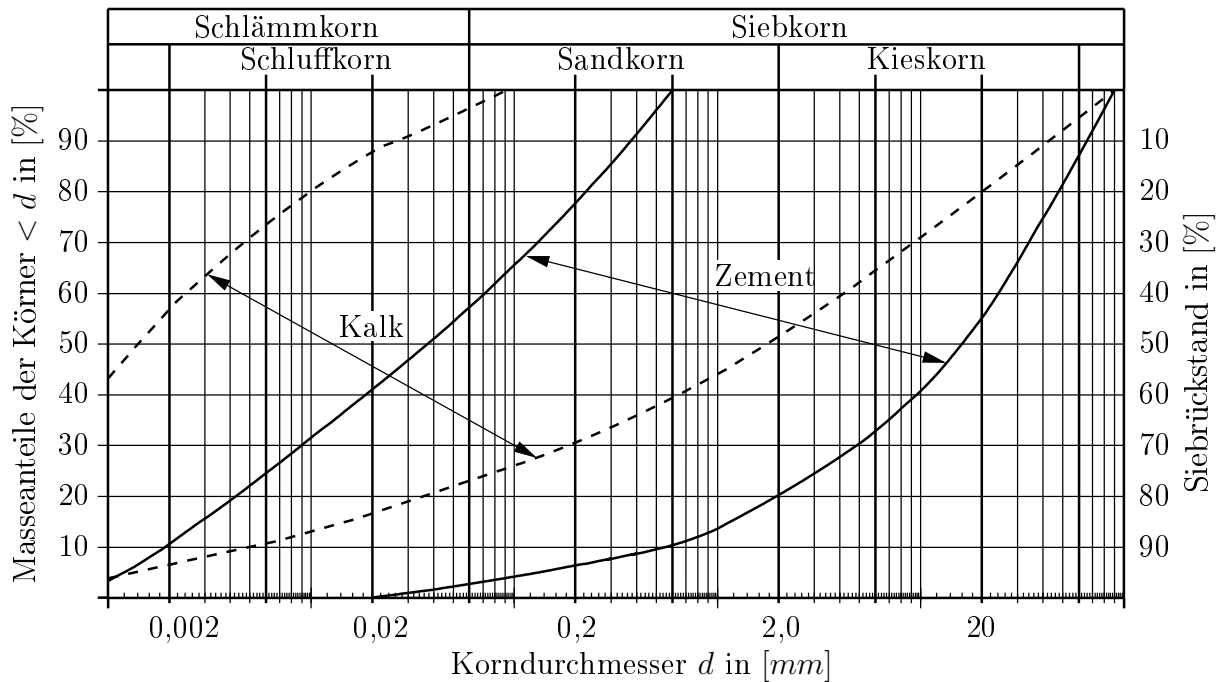


Bild 2.4: Körnungsbereiche für Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen

Die unter dem Oberbegriff Bodenbehandlung geführten Verfahren werden aufgrund ihrer Sofort- und/oder Langzeitwirkung in Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen eingeteilt.

2.2.1 Bodenverbesserungen

Bodenverbesserungen stellen diejenigen Verfahren dar, die zur Verbesserung der Einbaufähigkeit und Verdichtbarkeit des Erdstoffs führen. Hierzu werden Bindemittel oder geeignete Baustoffe in den Erdstoff eingebracht.

Die durch die Zugabe geringer Bindemittelmengen hervorgerufene Reduktion des Wassergehaltes sowie die Strukturverbesserung des Erdstoffs stehen hierbei im Vordergrund. Vor allem nasse, nicht ausreichend verdichtbare Böden werden durch diese Effekte einbau- und verdichtungsfähig. Besondere Bedeutung für die Verbesserung von fein- und gemischtkörnigen Erdstoffen besitzen die Weißkalke in gelöschter oder ungelöschter Form.

Praktischen Einsatz finden Bodenverbesserungen bei Erdarbeiten für Straßen, Wege und sonstige Verkehrsflächen. Ein typisches Ausführungsbeispiel stellen Baustellentransportwege dar. Der verbesserte Erdstoff wird aber auch als Einbaumaterial für Hinter- bzw. Verfüllungen genutzt. Ein weiteres Anwendungsgebiet für Bodenverbesserungen ist die Hang- bzw. Böschungssicherung, da an natürlichen Hängen oder erstellten Böschungen durch die Witterung hervorgerufene Erosionen eine Denudation des Geländes verursachen können. Die durch die Bindemittelzugabe veränderten bodenphysikalischen Eigenschaften wie Wassergehalt, Durchlässigkeit und Scherfestigkeit bewirken einen Erosions- und Witterungsschutz. Zusätzlich können schwer verarbeitbare Erdstoffe durch eine Bodenverbesserung mit Kalk für eine anschließende Bodenverfestigung aufgeschlossen werden [24].

2.2.2 Bodenverfestigungen

Bodenverfestigungen sind Verfahren, mit denen eine erhöhte Widerstandsfähigkeit von Böden gegen Beanspruchungen durch mechanische Belastungen und Klima erreicht wird. Die durch Zugabe von Bindemittel verfestigten Böden zeichnen sich durch eine dauerhafte Tragfähigkeit und Frostsicherheit aus.

Verfestigungen von Böden werden in der oberen Zone des Untergrundes oder Unterbaues von Straßen und Wegen sowie anderen Verkehrsflächen ausgeführt [27]. Neben der verbesserten Einbaufähigkeit ist hauptsächlich eine dauerhafte Tragfähigkeitserhöhung und Frostbeständigkeit erwünscht. Je nach Aufgabenzweck der Verfestigung sowie Art und Beschaffenheit des Bodens werden hydraulische Bindemittel, Baukalke oder bituminöse Bindemittel eingesetzt. Bodenverfestigungen werden hauptsächlich im Straßenbau

- zur Verfestigung der Planumsschicht als hochtragfähige Unterlage von Straßenoberbauschichten,
- als Voll- oder Teilersatz der im Oberbau üblichen mineralischen Frostschutzschicht durch frostsicheres Verfestigen des in der Planumsschicht anstehenden oder eingebauten Bodens,
- zur Verfestigung der mineralischen Frostschutzschicht im Oberbau von Straßen sowie
- zur Befestigung untergeordneter Straßen, Erdstraßen und Wege

ausgeführt. Darüber hinaus werden Bodenverfestigungsverfahren bei der Stabilisierung des Untergrundes bzw. Unterbaues von Rad- und Gehwegen, Flugplätzen, Container-Abstellflächen, Industrieflächen, Fundamentplatten oder Sportplätzen eingesetzt.

Nachfolgend wird ausschließlich auf Bauverfahren eingegangen, die die anorganischen Bindemittel Kalk und Zement als Mischgut nutzen.

2.3 Bauverfahren

Zur Herstellung von weitgehend homogenen Boden-Bindemittel-Gemischen bzw. Baustoff-Bindemittel-Gemischen kommen entweder das Zentralmischverfahren oder das Baumischverfahren zum Einsatz.

2.3.1 Zentralmischverfahren (mixed-in-plant)

Bei diesem Bauverfahren erfolgt das Mischen des Bodens mit dem Bindemittel und die Zugabe des erforderlichen Wassers in einer ortsfesten Mischanlage. Das i.a. wirtschaftlich ungünstige Zentralmischverfahren findet nur dann Anwendung, wenn der Einsatz von Mischgeräten (z.B. bei Schächten, Gräben, Bauwerksbereichen, Straßenabläufen oder Straßenverbreiterungen) nicht möglich ist. Das in zentralen Anlagen gefertigte Mischgut wird mit Lastkraftwagen zur Einbaustelle transportiert und dort in der Regel mit Ferti-gern gleichmäßig eingebaut, verdichtet und ggf. nachbehandelt.

2.3.2 Baumischverfahren (mixed-in-place)

Bei dem Baumischverfahren wird der Mischvorgang direkt vor Ort an der vorbereiteten, zu behandelnden Schicht ausgeführt. Hierbei kommen spezielle Gerätezüge, bestehend aus Bindemittel-Verteilgerät, Sprengwagen oder Sprühbalken sowie Misch- und Verdichtungsgerät, zum Einsatz. In Bild 2.5 ist ein typisches Schema eines Mischgerätes des Baumischverfahrens dargestellt.

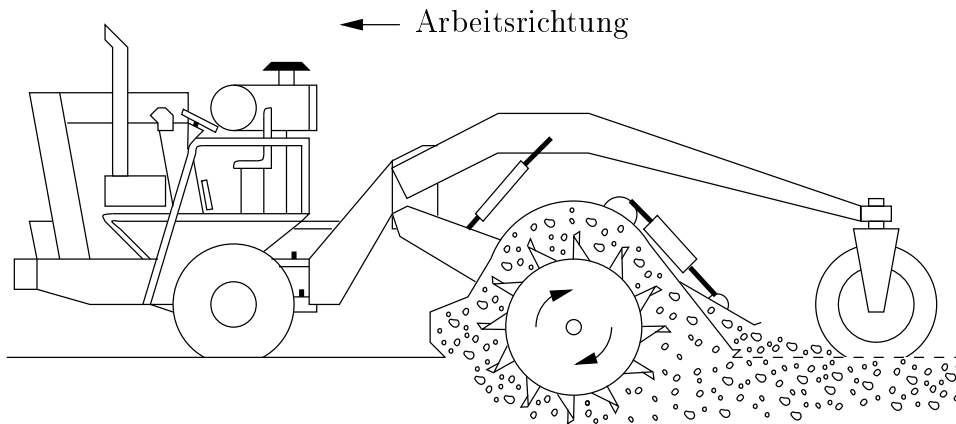


Bild 2.5: Mischgerät beim Baumischverfahren (mixed-in-place)

Die verfahrenstechnischen Arbeitsschritte des Baumischverfahrens bestehen aus:

- Vorbereitenden Arbeiten

Zu den vorbereitenden Arbeiten zählen der Abtrag des Oberbodens, das Zerkleinern schwerer Böden, das Vorplanieren und Profilieren einer Querneigung und ggf. das Aufschließen sehr feuchter Böden mit Weißkalk sowie die Vorverdichtung.

- Verteilen des Bindemittels

Die in der Eignungsprüfung ermittelte Bindemittelmenge wird mit einem Streufahrzeug mit Dosiervorrichtung (Bild 2.6) auf den vorbereiteten Erdstoff ausgebracht. Die hierbei auftretende Staubeentwicklung kann durch geeignete Maßnahmen, wie bspw. die Aufräuhung der Oberfläche reduziert werden.



Bild 2.6: Verteilen des Bindemittels auf der vorbereiteten Oberfläche

- Einmischen des Bindemittels in den Boden

Das ausgebrachte Bindemittel wird mit geeigneten Spezialmaschinen, wie in Bild 2.7 dargestellt, in den Boden eingemischt. Die Mischtiefe sowie die Anzahl der Mischdurchgänge muss so gewählt werden, dass eine Homogenisierung des Erdstoff-Kalk-Gemisches gewährleistet werden kann. Nach dem Mischvorgang soll die behandelte Bodenschicht eine einheitliche Farbe und Struktur aufweisen.



Bild 2.7: Einmischen des Bindemittels und homogenisieren Gemisches

- Planieren und Verdichten des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches

Grundsätzlich eignen sich für das Verdichten des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches alle im Erdbau üblichen Verdichtungsgeräte, mit denen die geforderten Verformungsmoduls und Verdichtungsgrade erzielt werden können. Da Kalkbehandlungen überwiegend bei fein- und gemischtkörnigen Erdstoffen zum Einsatz kommen, ist es üblich, durch knetenden Verdichtung mit Schafffußwalzen (Bild 2.8) die geforderten Verdichtungsgrade zu erzielen. Die Verdichtung und Glättung der oberen Zone wird abschließend mit Glattmantelwalzen ausgeführt.



Bild 2.8: Verdichten des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches mit Schafffußwalzen

Eine übersichtliche Darstellung der erforderlichen Arbeitsschritte der zuvor behandelten Bauverfahren enthält das Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln [24] in den Tabellen 2.1 und 2.2.

2.4 Prüfungen bei Bodenbehandlungen

Werden Bodenbehandlungsmaßnahmen bei Bauprojekten in Betracht gezogen, so sind die erforderlichen Eignungsprüfungen rechtzeitig, in der Regel 5 bis 8 Wochen vor Baubeginn, einzuleiten. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Art und Menge des Bindemittels, des Wassers und die Menge eventuell einzusetzender Zusatzstoffe sowie die Brauchbarkeit des Bodens und Boden-Bindemittel-Gemisches nachzuweisen. Die Eignungsprüfungen sind gemäß den Technischen Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB), Teil B 11.1 [25] und Teil B 11.5 [26], auszuführen. Weitere, baubegleitende Prüfungen in Form von Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen sind in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTVE-StB) [27] geregelt.

Die nach den TP BF-StB auszuführende Eignungsprüfung umfasst Untersuchungen

- des unbehandelten Bodens,
- des verwendeten Bindemittels sowie
- des Boden-Bindemittel-Gemisches.

Hierfür sind im allgemeinen Probemengen von 100 kg je Bodenart sowie 10 kg Bindemittel (bei Kalken) bzw. 25 kg Bindemittel (bei Zementen) zu entnehmen. In Tabelle 2.1 sind die nach [26] geforderten Untersuchungen einer Bodenbehandlung mit Kalk dargestellt.

Tabelle 2.1: Umfang der Prüfungen [26]

Prüfungen	Boden- verbesserung		Boden- verfestigung	
	FK	KH	FK	KH
1. Boden				
1.1 Wassergehalt	X	X	X	X
1.2 Proctordichte und optimaler Wassergehalt	X	X	X	X
1.3 Korngrößenverteilung	(X)	(X)	X	X
1.4 Zustandsgrenzen	(X)	(X)	(X)	(X)
1.5 Organisch-chemische Bestandteile	(X)	(X)	(X)	(X)
2. Kalk				
2.1 Anforderungen der DIN 1060	(X)	(X)	(X)	(X)
3. Boden-Kalk-Gemisch				
3.1 Proctordichte und optimaler Wassergehalt	X	X	X	X
3.2 Zustandsgrenzen	—	—	(X)	(X)
3.3 Einaxiale Druckfestigkeit nach Frostbelastung	—	—	X	X
Abkürzungen: FK – Feinkalk, KH – Kalkhydrat In Klammern gesetztes X bedeutet: Prüfungen werden nur, wenn sie alternativ oder ergänzend erforderlich sind, ausgeführt.				

Kapitel 3

Versuchsprogramm

Das Reaktionsverhalten von bindigen Erdstoffen bei Kalkzugabe ist in definierten bodenmechanischen Eignungsprüfungen zu ermitteln. Der Umfang dieser Prüfungen ist bereits in Tabelle 2.1 dargestellt worden. Ausgehend von den geforderten Nachweisen für Bodenverfestigungen werden diese um praxisnahe Randbedingungen, wie Einbautechnologie und Witterungseinflüsse sowie durch den Einsatz von Zusatzstoffen, erweitert.

3.1 Einbautechnologie

Erdfeuchte, bindige Erdstoffe lassen sich effektiv durch eine Knet- und Walkwirkung verdichten. Vor Ort werden hierfür überwiegend Schafffußwalzen nach Bild 2.8 eingesetzt. Um diese in-situ-Effekte möglichst genau abzubilden, wurde daher eine praxisnahe Einbautechnologie der Erdstoff-Bindemittelgemische für die Probenherstellung entwickelt.

In vorhergehenden Laborversuchen konnte festgestellt werden, dass durch die Proctorverdichtungsmethode erhebliche zonale Dichteunterschiede in Probekörpern auftreten [68]. Hieraus resultieren lokal differierende Wassersättigungsgrade S_r innerhalb der Proben. Eine verstärkte Wassereinlagerung tritt vor allem durch die herstellungsbedingte, nicht optimale Verdichtung an den Schichtgrenzen der Einbaulagen im Mantelbereich der Probekörper auf. Somit werden verbundzerstörende Volumenzunahmen bei Frostbelastungen begünstigt, die im Inneren eines Straßenplanums in dieser Form nicht zu erwarten sind.

Um diese Inhomogenitäten zu minimieren, wurde in Anlehnung an die Bauverfahren des Abschnitts 2.3.2 eine Kombination aus knetender Verdichtung und statischer Druckverdichtung für die Probekörperherstellung nach [69] gewählt.

3.2 Lagerungsbedingungen

Bodenbehandlungen mit Kalk führen zu sofortigen Strukturumwandlungen und langfristigen Verfestigungen von bindigen Erdstoffen. In Anbetracht der langsam verlaufenden Erhärtungsreaktionen sollen daher Bodenbehandlungsmaßnahmen mindestens zwei Monate vor Einsetzen des ersten Frostes abgeschlossen sein [27]. Um den Einfluss des jahres-

zeitlichen Ausführungszeitpunktes zu erfassen, wurden vier unterschiedliche Temperaturabfolgen geplant, denen die Probekörper ausgesetzt waren.

Bodenbehandlungsmaßnahmen mit Kalk werden überwiegend bei feinkörnigen Erdstoffen ausgeführt. Kennzeichnend für diese Erdstoffe sind geringe Wasserdurchlässigkeiten. Werden Bodenbehandlungen während einer Schlechtwetterphase ausgeführt und ist die Querneigung bzw. Ebenheit der behandelten Schicht nicht optimal ausgebildet, so kann es zur Einwirkung von stehendem Wasser auf dieser kommen. Um diesen Einfluss zu erfassen, wurde eine Lagerung der Probekörper partiell auch unter Wasser vorgesehen.

3.3 Kalkanteil

Aus Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Bodenverbesserungen mit Kalk ist bekannt, dass eine Reduktion der Frostempfindlichkeitsklasse von F3 zu F2 erfolgen kann, wenn die Kalkzugabemenge mehr als 3% der Erdstofftrockenmasse beträgt [63, 64, 65]. Aufgrund von reaktiven Beimengungen zum Erdstoff wurde ein Kalkanteil zwischen 2 und 6 Masseprozent gewählt.

3.4 Zumahlstoffe

Es ist bekannt, dass in langfristigen Reaktionen der zugegebene Kalk mit den silikatischen und aluminatischen Bestandteilen des Tones festigkeitsteigernde Calciumsilikathydrat- und Calciumaluminathydratphasen bildet. Zur Intensivierung dieser Reaktionen wurde in Anlehnung an die Betontechnologie der Einsatz von latent hydraulisch wirkendem, gemahlenem Hüttensand, puzzolanisch reagierender Steinkohleflugasche sowie testweise Aluminiumpulver als Zusatzstoff erprobt.

Kapitel 4

Ausgangsstoffe - Tone, Kalkhydrat und Hüttensand

4.1 Tone

Als Tone werden unverfestigte Sedimentgesteine bezeichnet, die hauptsächlich aus Mineralpartikeln kleiner $20\ \mu m$ bestehen. Die größte Fraktion innerhalb dieser Partikelgruppe nehmen blättchenförmige silicatische Tonminerale ein, die Teilchendurchmesser von weniger als $2\ \mu m$ aufweisen [41]. Das Hauptvorkommen an tonigen Sedimentgesteinen ist jedoch verfestigt und wird unter dem Begriff Tonstein zusammengefasst.

Die in den Tönen hauptsächlich vertretenen Tonminerale entstehen durch die Verwitterung von Silicatgesteinen. Als Verwitterungsneubildung entstehen überwiegend wasserhaltige Aluminiumsilicate, aber auch oxidische Eisenminerale und Aluminiumhydroxide. Neben diesen Verwitterungsneubildungen enthalten Tone Verwitterungsreste und Mineralneubildungen. Insbesondere die widerstandsfähigen Primärminerale Quarz, Muskovit und Feldspat treten als Verwitterungsreste in Tönen auf. Die bekanntesten Mineralneubildungen in Tonsteinen sind das Silikat Glaukonit, die Carbonate Calcit und Dolomit sowie das Eisensulfid Pyrit.

Tone und Tonsteine bilden mit etwa 80% den größten Anteil an den Sedimenten. Durch Abtragung, Transport und Umlagerung weisen fast alle Tone eine Schichtung auf. Ausnahmen stellen die Böden dar, in denen gröbere, unzersetzte Gesteins- und Mineralreste mit Tonmineralen vermischt sind. Die typischen Eigenschaften von Tonböden, wie Wasserbindungsvermögen, Quellen, Dichtungsvermögen oder Plastizität, werden durch die silicatischen Tonminerale hervorgerufen.

4.1.1 Aufbau von Tonmineralen

Tonminerale sind Sekundärminerale, die durch Verwitterungsneubildung aus silicatischen Primärmineralen entstehen. Die Grundbausteine der Tonminerale bilden $[\text{SiO}_4]$ -Tetraeder und $[\text{M}(\text{O}, \text{OH})_6]$ -Oktaeder. In Bild 4.1 ist der Aufbau dieser Grundeinheiten dargestellt. Tonminerale bestehen aus parallelen, übereinander gestapelten Tetraeder- (T) und Okta-

ederschichten (O). In Abhängigkeit der Schichtenabfolge werden die Tonminerale in Zwei- bis Vierschichtminerale unterteilt.

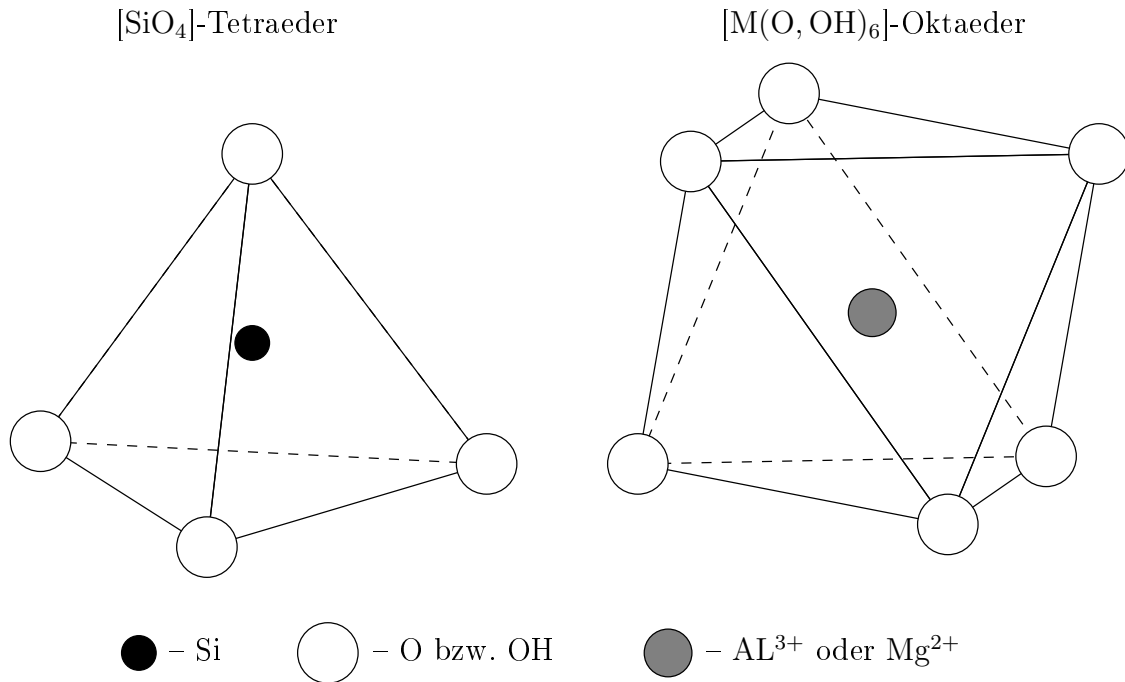


Bild 4.1: Bausteine der silicatischen Tonminerale

Eine Si–O–Tetraederschicht besteht aus [SiO₄]-Tetraedern, wobei eine Verknüpfung über gemeinsam genutzte Sauerstoffionen besteht. In der Ebene bilden diese ein Netzwerk aus Sechseringen. An den in eine Richtung zeigenden freien Spitzen der [SiO₄]-Tetraeder kondensiert eine Oktaederschicht, sodass diese Sauerstoffionen gleichzeitig von beiden Grundbausteinen genutzt werden. Die in der Oktaederschicht nicht zu Tetraedern gehörenden Sauerstoffionen binden ein Proton und liegen somit als Hydroxidionen (OH[−]) in der Mineralstruktur vor. In Bild 4.2 ist die Ebenenstruktur dargestellt.

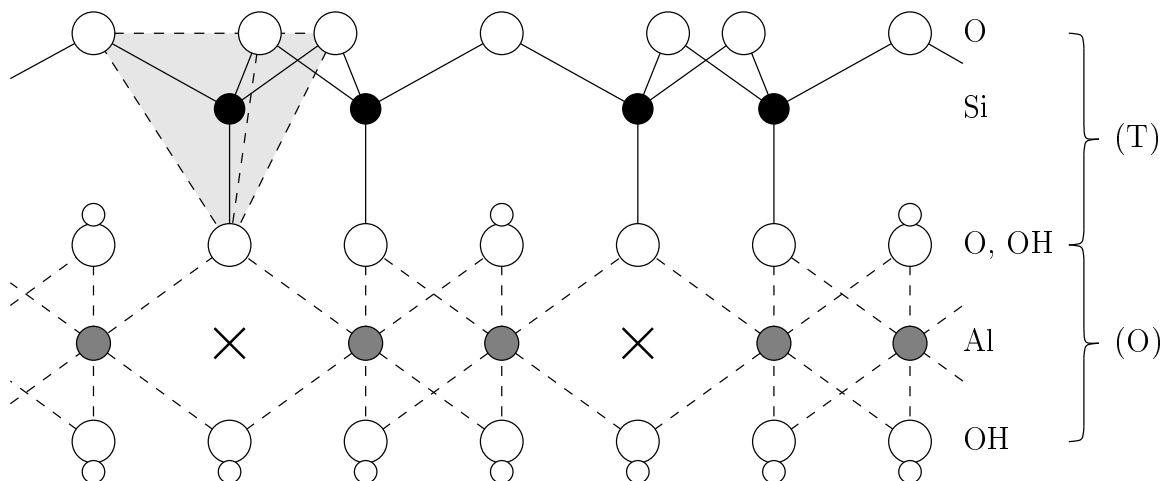








Bild 4.2: Tetraederschichten (T) und Oktaederschichten (O) in den Schichtsilikaten [41]

Tonminerale, deren Schichten aus je einer Tetraeder- und Oktaederschicht (TO-Struktur) bestehen, bilden die Gruppe der Zweischnitt- oder auch 1:1-Tonminerale. Die ungeladenen

TO-Schichten werden untereinander durch Wasserstoffbrückenbindungen zusammengehalten. Da diese $[\text{OH} - \text{O}]$ -Bindungen relativ stark sind, können sich keine Wassermoleküle zwischen den TO-Schichten einlagern. Zweischicht-Tonminerale neigen daher kaum zu Schwellungen und Schrumpfungen. Der Hauptvertreter der 1:1-Tonminerale ist das Kaolinit.

Dreischicht- oder 2:1-Tonminerale bestehen zusätzlich aus einer weiteren Tetraederschicht (TOT-Struktur). Im Allgemeinen sind die TOT-Schichten durch Substitution von höherwertigen durch niederwertige Ionen negativ geladen. Auch der isomorphe Ersatz von Si^{4+} -Ionen durch Al^{3+} -Ionen in den Tetraederschichten trägt hierzu bei. Im Bereich der Schichtgrenzen liegen sich die sauerstoffbesetzten Spitzen der Tetraeder gegenüber. Um einen elektrostatischen Ausgleich dieser negativen Schichtladung zu schaffen, werden positiv geladene Gegenionen eingelagert. Zusätzlich können sich Wassermoleküle zwischen den Silicatschichten ansammeln, sodass es bei Hydratation der Zwischenschichtkationen zu Schichtaufweitungen kommt. Besonders das 2:1-Tonmineral Montmorillonit neigt zu starken Änderungen des Schichtenabstandes, in Form von intrakristalliner Quellung [46].

Tabelle 4.1: Aufbau und Bindungen der Tonminerale nach [59]

Tonmineral	Struktursymbol	Bindung	Form des Minerals
Kaolinit		O – OH fest	6-eckige Plättchen
Halloysit		O – OH	Stäbchen (Röhrchen)
Illit		K fest	Plättchen
Montmorillonit		O – O sehr schwach	dünne Plättchen
 Si-O-Tetraeder-Schicht  Oktaeder-Schicht mit Al als Kation			

In Tabelle 4.1 sind die verschiedenen Bindungsarten zwischen den Schichtpaketen der Tonminerale dargestellt.

4.1.2 Eigenschaften von Tonmineralen

Eine der kennzeichnenden Eigenschaften der Tonminerale stellt ihr ausgeprägtes Kationenaustauschvermögen dar. Infolge der permanenten negativen Ladung der Basisflächen werden Kationen als Ladungsausgleich in den Zwischenschichten adsorbiert. Die Anzahl dieser Zwischenschichtkationen wird hierbei durch die Schichtladung festgelegt und ist pH-Wert unabhängig [42]. Die Austauschfähigkeit der Zwischenschichtkationen gegen andere Kationen ist bei den Tonmineralen sehr variabel. Während bei den Smectiten ein vollständiger Ersatz aller Zwischenschichtkationen erfolgen kann, werden die fest gebundenen Kaliumionen der Illite nur an den Rändern oder Außenflächen ausgetauscht.

Ein weiterer Austausch von Kationen findet an den Rändern der Tonminerale statt. Durch Bindung oder Abspaltung von Protonen entsteht eine variable Randladung, die vom pH-Wert abhängig ist. Während im sauren Bereich positive Randladungen infolge Protonenüberschuss entstehen, liegen im basischen Bereich negative Randladungen vor, die auf Dissoziation von Silanol- und Aluminolgruppen beruhen. In Bild 4.3 sind die Randladungen für saure und basische Bodenlösungen dargestellt.

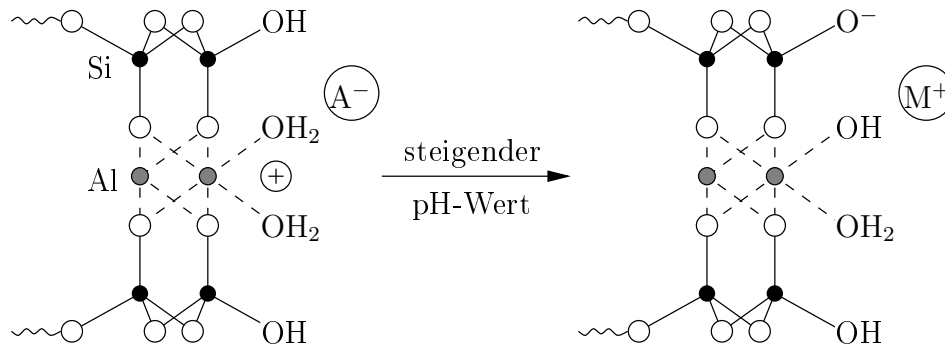


Bild 4.3: Variable Randladungen in Abhängigkeit des pH-Wertes. Anionenaustausch im sauren Bereich und Kationenaustausch im alkalischen Bereich [42]

Je größer die spezifische Oberfläche eines Tonminerals ist, desto stärker nimmt mit steigender Basizität die negative Oberflächenladung und Kationenaustauschkapazität zu. In Erdstoffen mit basischer Bodenlösung dissoziieren vor allem die Silanolgruppen (Si-OH), sodass an den Bindestelle der abgespaltenen Protonen H^+ andere Kationen angelagert werden können. Tonminerale weisen eine Selektivität gegenüber austauschbaren Kationen auf. Entsprechend der Reihenfolge werden $\text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ als einwertige Kationen und $\text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ als zweiwertige Kationen bevorzugt [42]. Die Selektivität nimmt mit steigender Belegungsdichte des bevorzugten Ions ab. Somit beeinflusst das Mengenverhältnis der Kationen untereinander deren Eintauschstärke.

Auch die Plastizität und das Quellverhalten der Tone wird durch die Oberflächenladung der Tonminerale maßgeblich beeinflusst. In Abhängigkeit der austauschbaren Kationen und der Elektrolytkonzentration der Porenlösung ändern sich die plastischen Eigenschaften. Bei intrakristallin nicht quellfähigen Tonmineralen, wie Kaolinit, ist die Plastizität von der Teilchenanordnung abhängig. Bei hohlraumreicher Anordnung der Tonminerale steigt aufgrund von Wassereinlagerungen die Plastizität. In Bild 4.4 sind mögliche Teilchenausrichtungen dargestellt.

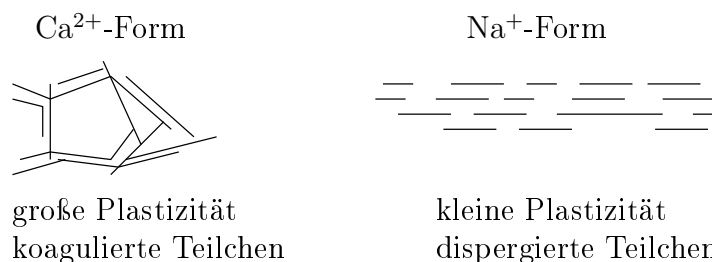


Bild 4.4: Abhängigkeit der Plastizität von der Teilchenanordnung bei intrakristallin nicht quellfähigen Tonen [46]

Im Gegensatz hierzu wird bei intrakristallin quellfähigen Tonmineralen die Plastizität vom Schichtabstand der Tonminerale bestimmt. In Bild 4.5 ist der Zusammenhang zwischen Schichtabstand und Plastizität eines Montmorillonit dargestellt.

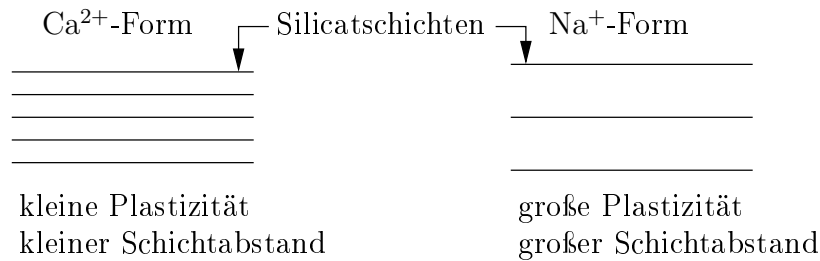


Bild 4.5: Abhängigkeit der Plastizität von der intrakristallinen Quellung [46]

Die intrakristalline Quellung beruht auf der Hydratation der austauschbaren Kationen. Bei trockenen, quellfähigen tonigen Erdstoffen befinden sich die Zwischenschichtkationen direkt auf den Schichtflächen. In Kontakt mit Wasser hydratisieren diese und ordnen sich in der Mittelebene zwischen den Schichtflächen an, sodass der Schichtabstand aufgeweitet wird. Aufgrund von Konzentrationsunterschieden der Kationen auf den Tonmineraloberflächen und in der Porenlösung kommt es im Weiteren zu osmotischen Quellungen [46].

Aufgrund der Ladungsverteilung besteht eine Wechselwirkung zwischen dem Tonmineral und der elektrolytischen Porenlösung. Das durch die negativ geladene Tonmineraloberfläche erzeugte elektrische Feld führt zur Adsorption von Ionen und polarisierten Wassermolekülen. Die Bindungsstärke zwischen Festkörper und Elektrolyt nimmt mit wachsender Entfernung von der Phasengrenze ab.

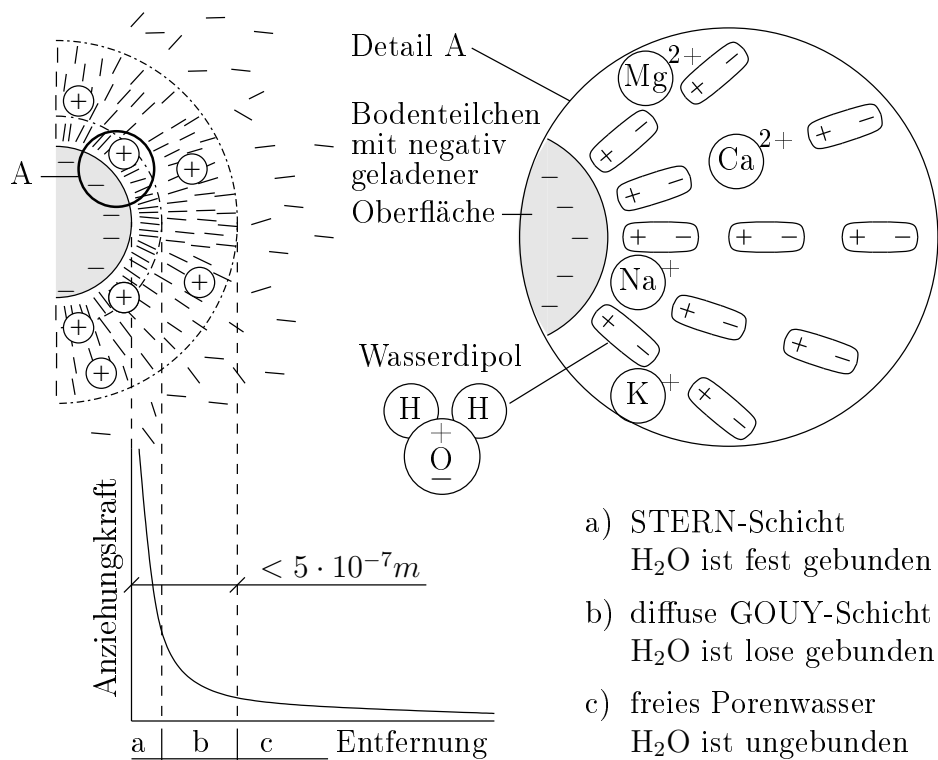


Bild 4.6: Schema der elektrischen Doppelschicht um ein Mineralkorn [58]

Die infolge der Adsorptionsspannung erzeugte elektrische, anionenfreie Doppelschicht in der flüssigen Phase wird in STERN- und GOUY-Schicht unterteilt. In Bild 4.6 ist diese Adsorptionswasserschicht dargestellt. Während in der STERN-Schicht die orientierten Wassermoleküle fest an die Mineraloberflächen gebunden sind, nimmt die Beweglichkeit der Wassermoleküle in der GOUY-Schicht zu. Der Übergang zum freien Porenwasser ist nicht scharf begrenzt, daher wird die GOUY-Schicht auch als diffuse Schicht bezeichnet. Die Ausprägung der Adsorptionswasserschicht wird durch angelagerte Kationen beeinflusst. Je nach Bindungsstärke ist die Dicke der STERN-Schicht sowie die Abgrenzung der GOUY-Schicht zum freien Wasser variabel. Besteht eine feste Bindung zwischen den Tonmineralen, wie sie K^+ -Ionen erzeugen, bilden sich nur wenige Hydrathüllen aus [34].

Die mineralogische Zusammensetzung des für die nachfolgenden Untersuchungen verwendeten bindigen Erdstoffs ist in Bild 4.7 und Tabelle 4.2 angegeben.

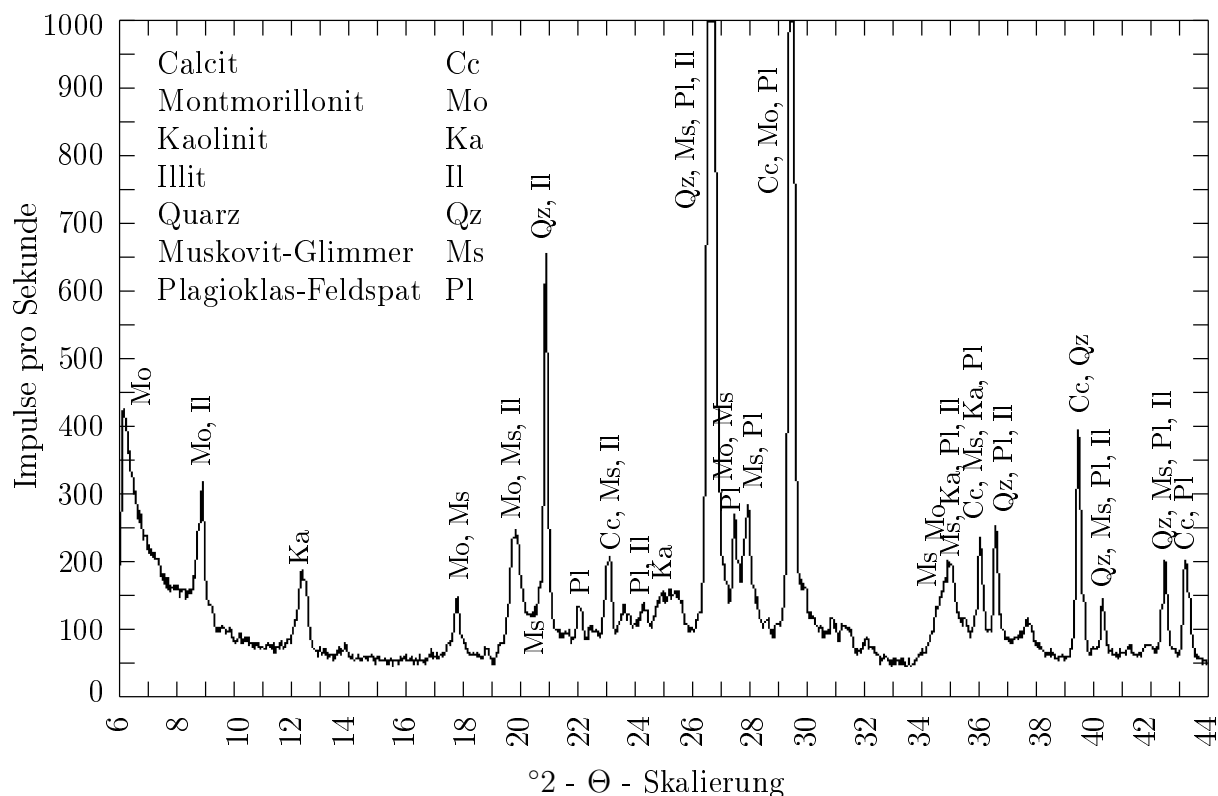


Bild 4.7: Röntgenfeinstrukturanalyse / Beugungsdiagramm des Erdstoffs

Tabelle 4.2: Mineralogische Verbindungen des Erdstoffs

Bezeichnung	Formel	Bemerkung
Quarz	SiO_2	kristallines Mineral, Qxid
Plagioklas	a) $NaAlSi_3O_8$ b) $CaAl_2Si_2O_8$	Feldspat, Mischkristall aus a) Natrium- und b) Calciumfeldspate
Muskovit	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$	Schichtsilikat, Glimmergruppe
Calcit	$CaCO_3$	Kalkspat, Mineral der Karbonatgruppe
Kaolinit	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Schichtsilikat, Tonmineral
Illit	$K_{0,7}Al_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$	Schichtsilikat, Tonmineral
Montmorillonit	$(Al_{1,7}, Mg_{0,3})Si_4O_{10}(OH)_2$	Schichtsilikat, Tonmineral

Mit dem dargestellten Beugungsdiagramm der Röntgenfeinstrukturanalyse lässt sich der aus der Wismarer Bucht stammende Erdstoff als ein Ton mit Anteilen aus Verwitterungsresten der Feldspat- und Glimmergruppe sowie Quarz einstufen. Aufgrund der maritimen Lagerstätte des nachfolgend betrachteten Erdstoffs kann das enthaltene Calcit teilweise der Biomineralisation zugeschrieben werden.

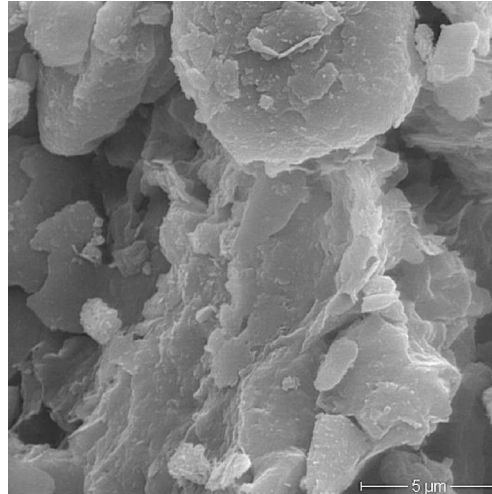


Bild 4.8: Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Erdstoffs

In Bild 4.8 ist eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Erdstoffs dargestellt.

4.2 Kalk

Kalk wird als Material definiert, das alle physikalischen und chemischen Formen beinhaltet, in denen Calcium- und Magnesiumoxid und/oder Calcium- und Magnesiumhydroxid enthalten sind. Kalk wird durch industrielles Brennen von Kalkstein gewonnen. Der im Bauwesen verwendete Kalk wird als Baukalk bezeichnet. Hierzu gehören die in Bild 4.9 dargestellten Kalkarten.

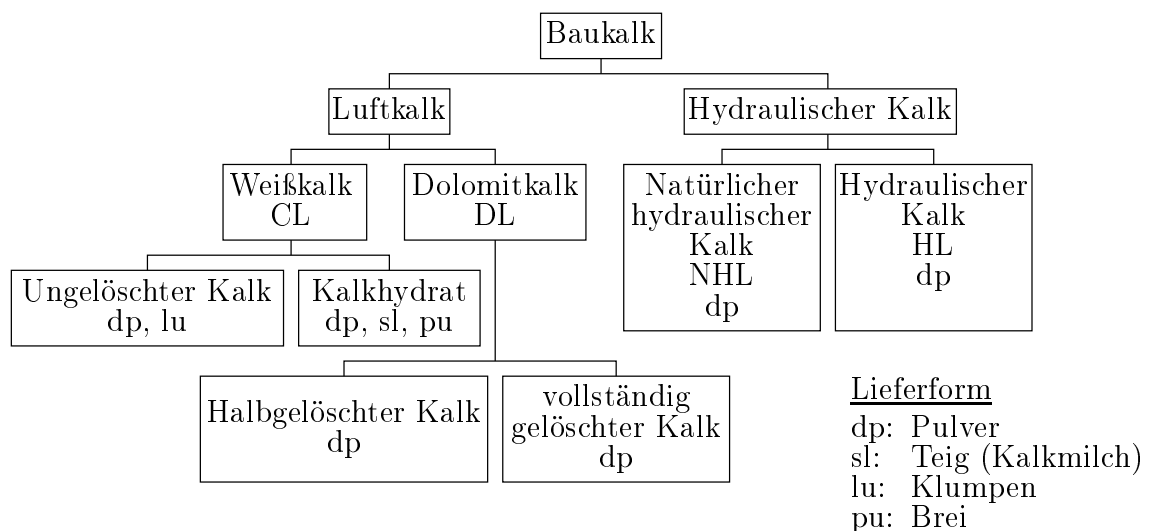


Bild 4.9: Schema für Kalkarten nach *DIN EN 459-1* [10]

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Branntkalkes werden durch die Brenntemperatur und die Art des Kalksteines und dessen Verunreinigungen bestimmt. Die technischen Brenntemperaturen liegen zwischen 900°C und 1350°C. Oberhalb von 1200°C treten Sintererscheinungen auf. In Bild 4.10 sind die natürlichen Kalk-Ton-Gesteine und deren Brennprodukte dargestellt.

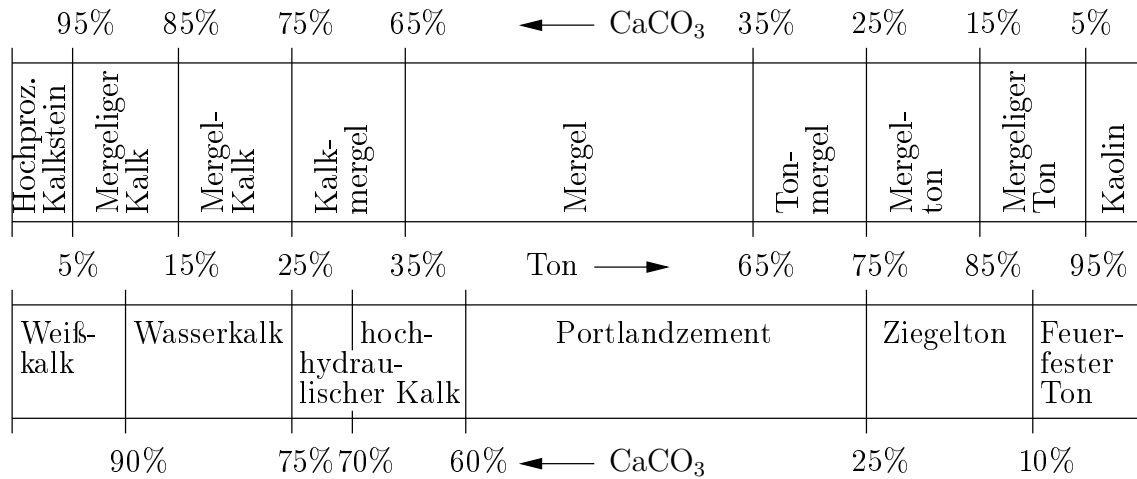


Bild 4.10: Übersicht der Kalk-Ton-Gesteine und ihrer industriellen Verwendung [56]

Während die Luftkalke sehr hohe Calciumoxidgehalte (CaO) und die Untergruppe der Dolomitkalke noch zusätzlich größere Anteile an Magnesiumoxid (MgO) aufweisen, enthalten die hydraulischen Kalke neben den Hauptoxiden CaO bzw. CaO+MgO noch Anteile aus Siliciumdioxid (SiO₂), Aluminiumoxid (Al₂O₃) und Eisen(III)-oxid (Fe₂O₃) aus der Tonfraktion, die als Hydraulefaktoren bezeichnet werden. Aufgrund der variierenden chemisch-mineralogischen Zusammensetzung unterscheiden sich die Kalke hinsichtlich ihrer Erhärtungseigenschaften.

Luftkalke entstehen durch das Brennen von Kalkstein oder mergeligen Kalk mit sehr geringen Anteilen an der Tonfraktion. Durch den Brennvorgang unterhalb der Sintergrenze, zwischen 900°C und 1000°C, entsteht aus dem Kalkstein (CaCO₃) Branntkalk, der vorwiegend aus Calciumoxid (CaO) besteht. In Gleichung 4.1 ist die endotherme Entsäuerungsreaktion des Calciumcarbonats dargestellt. Diese Zersetzung findet nur bei Energiezufuhr statt.



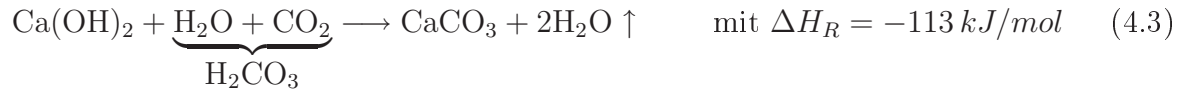
Kalkhydrat entsteht durch Hydratation des Branntkalkes. Die in Gleichung 4.2 dargestellte exotherme Reaktion wird in der Praxis als „Kalklöschchen“ bezeichnet.



Dieser Löschvorgang stellt die erste Reaktionsstufe zur Erhärtung des Baubindemittels Kalk dar. Die technische Herstellung des gelöschten Kalkes erfolgt durch Nass- oder Trockenlöschung. Während beim Nasslöschchen durch Wasserüberschuss ein Kalkbrei entsteht, wird beim Trockenlöschchen nur so viel Wasser zugegeben, dass das entstehenden

pulverförmige Kalkhydrat nur eine geringe Restfeuchte $< 1\%$ aufweist. Das Nasslöschen wird in der Kalkindustrie nur in Ausnahmefällen angewendet [56].

Die Erhärtung der Luftkalke beruht auf der Bindung von Kohlensäure (H_2CO_3) durch die Base Calciumhydroxid. In Gleichung 4.3 ist diese exotherme Reaktion dargestellt.



Die Kohlensäure bildet sich aus atmosphärischen Kohlendioxid (CO_2) und Wasser, das in der Regel durch Zugabe von Anmachwasser zur Verfügung steht. Aufgrund des geringen CO_2 -Gehaltes der Luft verläuft die carbonatische Erhärtung sehr langsam, sodass die Reaktionswärme nicht wesentlich in Erscheinung tritt. Mit der Verfestigung schließt sich der Kalkkreislauf, sodass aus dem Rohstoff Kalkstein (CaCO_3) über die Zwischenstufen Branntkalk (CaO) und Löschkalk ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) wiederum CaCO_3 als Erhärtungsprodukt entsteht [51].

Hydraulische Kalke unterliegen den selben Herstellungsprozessen wie die Luftkalke, jedoch enthält der zu brennende Kalkstein einen höheren Anteil an der Tonfraktion, wie in Bild 4.10 ersichtlich ist. Die in der Tonfraktion enthaltenen Aluminiumsilikate gehen ab Brenntemperaturen von 500°C in amorphes SiO_2 und Al_2O_3 über [44]. Während des Brennprozesses gebildetes CaO reagiert mit diesen Hydraulefaktoren zu Calciumsilikat- und Calciumaluminatphasen. Enthält die Tonfraktion Eisenoxide, treten zusätzlich Calciumferritphasen auf. Die zuvor genannten Phasenprodukte verleihen dem Kalk hydraulische Eigenschaften, da sie bei Zugabe von Wasser zu festen, wasserunlöslichen Calciumsilikathydraten (CSH-Phasen) und Calciumaluminathydraten (CAH-Phasen) reagieren. Im Gegensatz zu den Luftkalen, erstarren und erhärten die hydraulische Kalke auch unter Wasser. Atmosphärisches Kohlendioxid trägt zusätzlich zum Erhärtungsprozess bei.

Die Klassifizierung der Luftkalke wird nach *DIN EN 459-1* aus der Summe ihres Calciumoxid- und Magnesiumoxidgehaltes und die Klassifizierung der hydraulischen Kalke nach ihrer Mindestdruckfestigkeit vorgenommen. In Tabelle 4.3 sind Baukalkarten und deren chemische Zusammensetzung dargestellt.

Tabelle 4.3: Chemische Anforderungen an Kalk^{a)} nach *DIN EN 459-1* (Auszug)

	Baukalkart	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Freier Kalk
2	CL 80	≥ 80	$\leq 5^c)$	≤ 7	≤ 2	—
4	DL 85	≥ 85	≥ 30	≤ 7	≤ 2	—
6	HL 2	—	—	—	$\leq 5^b)$	≥ 8
9	NHL 2	—	—	—	$\leq 5^b)$	≥ 15

^{a)} Werte in der Tabelle als Massenanteil in Prozent.

^{b)} Ein SO_3 -Anteil zwischen 3% und 7% ist zulässig, wenn die Raumbeständigkeit nach 28 Tagen Wasserlagerung nach einem in *EN 196-2* angegebenen Prüfverfahren nachgewiesen wurde.

^{c)} Ein MgO-Anteil bis 7% ist zulässig, sofern die Prüfung der Raumbeständigkeit nach *EN 459-2*, 5.3 bestanden wurde.

Der für die nachfolgenden experimentellen Untersuchungen verwendete Kalk ist ein Kalkhydrat, der noch Anteile von Calciumoxid (CaO) enthält, mit der Handelsbezeichnung CL80. In den Bildern 4.11 und 4.12 wird die Zusammensetzung dieses Baukalks demonstriert.

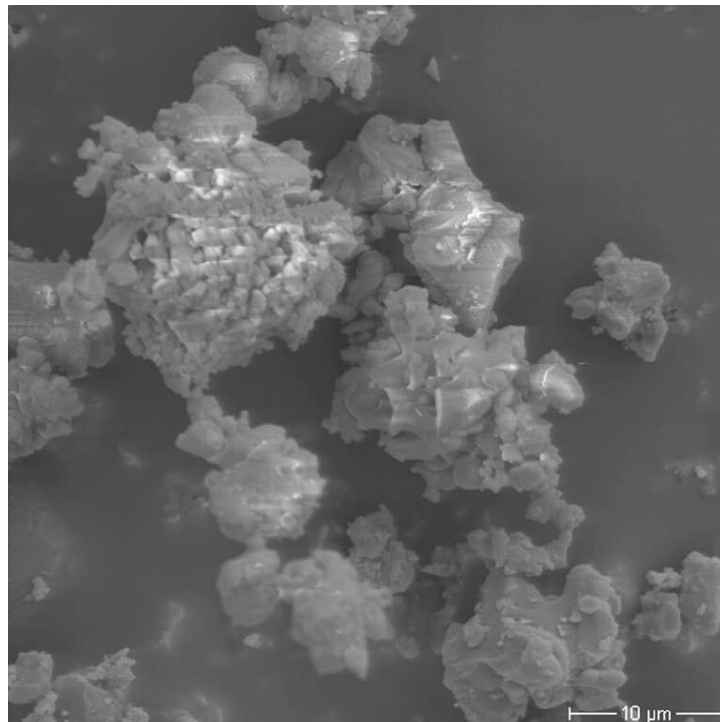


Bild 4.11: Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Baukalks CL80

In Bild 4.11 ist eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme (REM-Aufnahme) und in Bild 4.12 eine EDX-Analyse des verwendeten pulverförmigen Baukalks CL80 dargestellt.

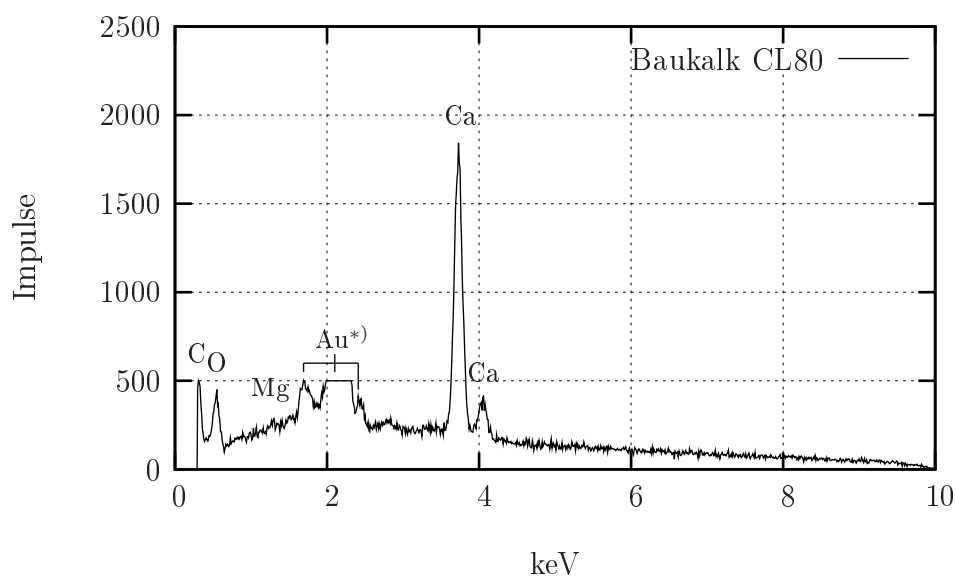


Bild 4.12: EDX-Analyse für Kalk CL80, Parameter: Beschl.-Spannung: 10 kV, Abnahme-
winkel: 35° (*) Oberfläche mit Gold besputtert)

Um zu verhindern, dass sich das Präparat während der Analysen durch den Elektronenstrahl elektrisch auflädt wurde die Oberfläche mit Gold bedampft. In der in Bild 4.12 dargestellten, mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX) aufgenommenen Elementanalyse ist der dominierende Goldreflex entfernt. Mit EDX-Analysen können alle Elemente des Periodensystems ab der Ordnungszahl 4 detektiert werden. Als Elemente sind Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Magnesium (Mg) und Calcium (Ca) indentifiziert worden. Hieraus ergeben sich unter anderem die Verbindungen Calciumhydroxid (Portlandit), Magnesiumhydroxid und Calciumcarbonat.

4.3 Hüttensand

Als Hüttensand werden granulierten Hochofenschlacken bezeichnet. Diese entstehen bei der Roheisenerzeugung im Hochofen, dessen Prinzipskizze in Bild 4.13 dargestellt ist.

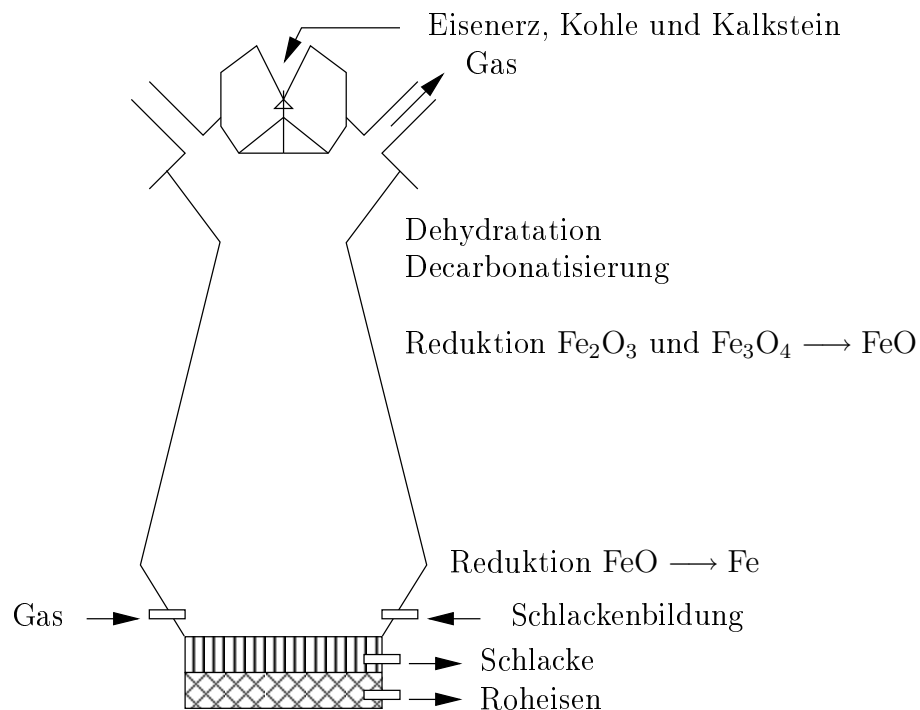


Bild 4.13: Hochofen nach *Regourd* aus *Stark & Wicht* [56]

Aus den Nebenbestandteilen des Eisenerzes, der Koksasche und dem Kalkstein entsteht die Schlackenmelze, die bei Temperaturen von 1350°C bis 1600°C durch den Schlackenstich abgezogen wird. Die Granulation der flüssigen Schlacke wird durch Abschrecken mit Wasser ausgelöst, dass durch Hochdruckdüsen aufgesprüht wird. Die in der Verhüttung entstandenen Kalk-Tonerde-Silikatschmelzen enthalten hauptsächlich CaO , MgO , SiO_2 und Al_2O_3 .

Hüttensande sind latent-hydraulisch, mit der Fähigkeit hydraulische Eigenschaften zu entwickeln. Voraussetzung hierfür ist eine sulfatische oder alkalische Anregung. Die Hydraulizität ist vom CaO/SiO_2 -Verhältnis abhängig [62]. Das hydraulische Erhärtungsvermögen steigt mit zunehmenden Gehalt an Calciumoxid und Magnesiumoxid, wobei sich höhere Aluminiumoxidgehalte positiv auf die Anfangsfestigkeit auswirken.

In den Bildern 4.14 und 4.15 sind die Zusammensetzung und der Aufbau des für die nachfolgenden Untersuchungen verwendeten Hüttensandmehls (HSM) wiedergegeben.

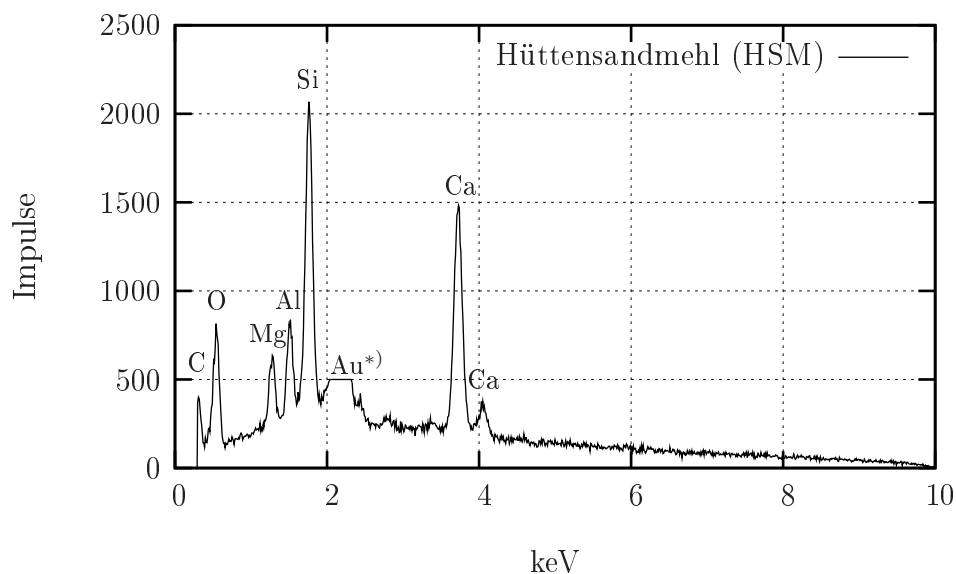


Bild 4.14: EDX-Analyse für Hüttensandmehl, Parameter: Beschl.-Spannung: 10 kV, Abnahmewinkel: 35° (*) Oberfläche mit Gold besputtert)

Die in Bild 4.14 dargestellte EDX-Analyse des Hüttensandes enthält neben den zuvor genannten Bestandteilen auch Anteile von Kohlenstoff (C), was auf das Vorhandensein von CaCO_3 (Calcit) schließen lässt.

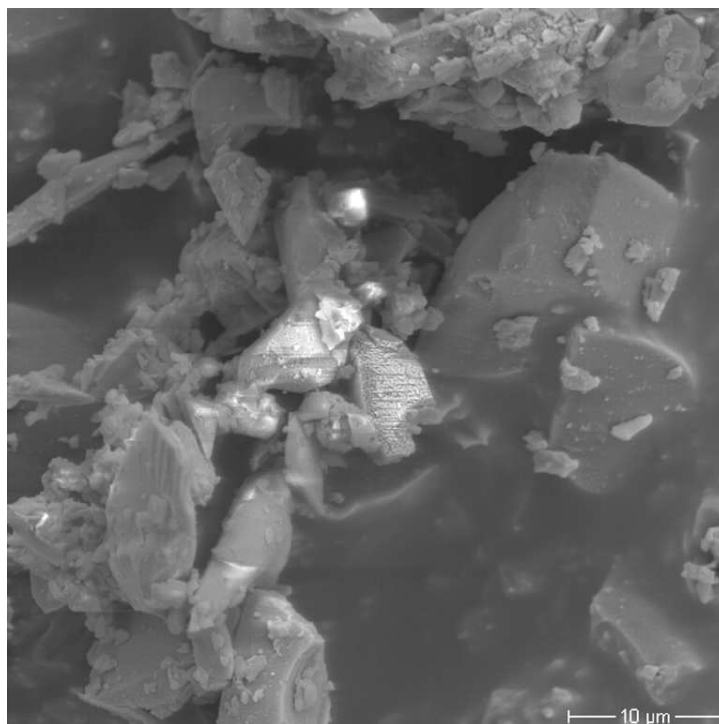


Bild 4.15: Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Hüttensandmehls (HSM)

Das Bild 4.15 zeigt eine REM-Aufnahme des pulverförmigen Hüttensandes.

Kapitel 5

Verfestigungsmechanismen von Ton-Kalk-Hüttensand-Gemischen

5.1 Erdstoff-Kalk-Reaktionen

Brannkalk und Kalkhydrat rufen in bindigen Erdstoffen sowohl chemische als auch physikalische Reaktionen hervor. Die Gesamtheit dieser Vorgänge beruht auf der Ionenwirkung des Kalkes, der Wirkung des Kalkhydratgels und auf Kristallneubildungen unter Beteiligung von Calcium [29]. Aufgrund der unterschiedlichen Reaktionsdauern werden diese in Sofort- und Langzeitreaktionen unterteilt. Die an diesen Reaktionen beteiligten Tonminerale können bis zur Fraktion des Mittelschluffkorns im Erdstoff enthalten sein [4].

5.1.1 Sofortreaktionen

Wird einem bindigen Erdstoff Luftkalk zugemischt, kann unmittelbar eine Koagulation der Tonminerale festgestellt werden. Die sich bildende Krümelstruktur ist die erste wahrnehmbare Veränderung des Erdstoffs, die durch die Sofortreaktionen hervorgerufen wird. Das Calciumhydroxid, das entweder durch das Löschen von Brannkalk im Erdstoff entsteht oder schon in Form von Kalkhydrat zugegeben wird, dissoziiert in der Porenlösung.

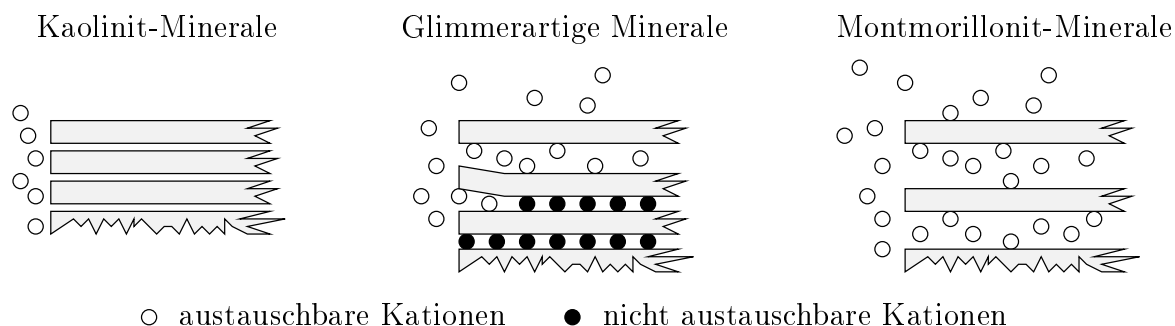


Bild 5.1: Kationenanlage, Kationenaustausch und intrakristalline Quellung der Tonminerale [29]

Die Ca^{2+} -Kationen verdrängen aufgrund ihrer höheren Eintauschstärke einwertige Kationen von den oberflächigen elektronegativen Bindungsstellen der Tonkolloide. Hierdurch

wird der Überschuss der negativen Oberflächenladung vermindert, sodass das elektrokinetische Potential und somit die abstoßenden Kräfte zwischen den gleichsinnig geladenen Kolloiden abnimmt. Sinkt das Potential unter einen kritischen Wert koagulieren die primären Kolloide zu größeren Sekundärkolloiden [2, 29].

Die Fähigkeit, Kationen anzulagern, ist vom Aufbau des Kristallgitters der Tonminerale abhängig. In Bild 5.1 ist schematisch das Kationenaustauschvermögen der Tonmineralgruppen dargestellt. Insbesondere das intrakristallin quellfähige Montmorillonit besitzt ein hohes Kationenaustauschvermögen. Aufgrund der Erweiterung des Basisabstandes der Elementarschichten bei Wasserzugabe vergrößert sich die innere Oberfläche des Tonminerals und somit die den Kationen zugängliche Oberfläche. In experimentellen Versuchen wurde die größere Reaktivität des Montmorillonits gegenüber dem Kaolinit mit Kalk nachgewiesen [43].

Das intrakristalline Quellverhalten der Smectite ermöglicht es den Ca^{2+} -Kationen sich zwischen den Elementarschichten der Tonminerale einzulagern. Hierdurch können die zweitwertigen Kationen zwischen den negativ geladenen Tonmineralen neutralisierende Ca-Brücken bilden [61]. Die durch die Brückenbildung hervorgerufene physikalische Festlegung des Wassers bewirkt eine Erhöhung des Verdichtungswassergehaltes und der Ausrollgrenze. Wird Branntkalk anstelle von Kalkhydrat dem Erdstoff zugegeben, so wird zusätzliches Wasser beim Löschvorgang chemisch gebunden. In Bild 5.2 ist die Wirkungsweise der Calciumbrücken dargestellt.

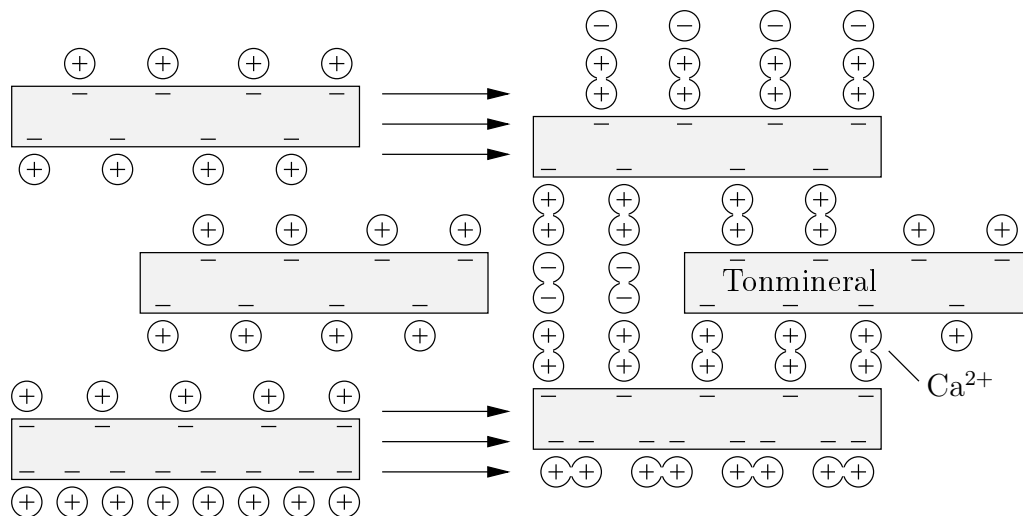


Bild 5.2: Äquimolarer Kationenaustausch der Calciumbrückenbindung bei aufweitbaren Tonkristallen mit geringer Ladungsdichte [29]

Die Sofortreaktionen zwischen Erdstoff und Kalk verändern somit aufgrund der Ionenwirkung die charakteristischen Erdstoffeigenschaften wie Plastizität, Verdichtungsverhalten, Wasserdurchlässigkeit und Wasserresistenz [3, 34, 5].

Im Gegensatz zu den aktiven Ca^{2+} -Reaktionen übernehmen die Hydroxyl-Ionen des dissoziierten Calciumhydroxids eine katalysierende Funktion. Durch den Konzentrationsanstieg der OH^- -Ionen können Protonen gebunden werden, was zu einem Anstieg des pH-Wertes führt. Die Protonen stammen überwiegend aus Silanolgruppen, die bei pH-Werten > 7 dissoziieren. An den freien Bindestellen können sich zusätzliche Calciumkationen anlagern,

sodass sich Si-O-Ca-Gruppen bilden. Ebenso dissoziieren die sich an den Rändern befindlichen Aluminolgruppen mit zunehmender Basizität, wodurch weitere Ca^{2+} -Kationen gebunden werden können.

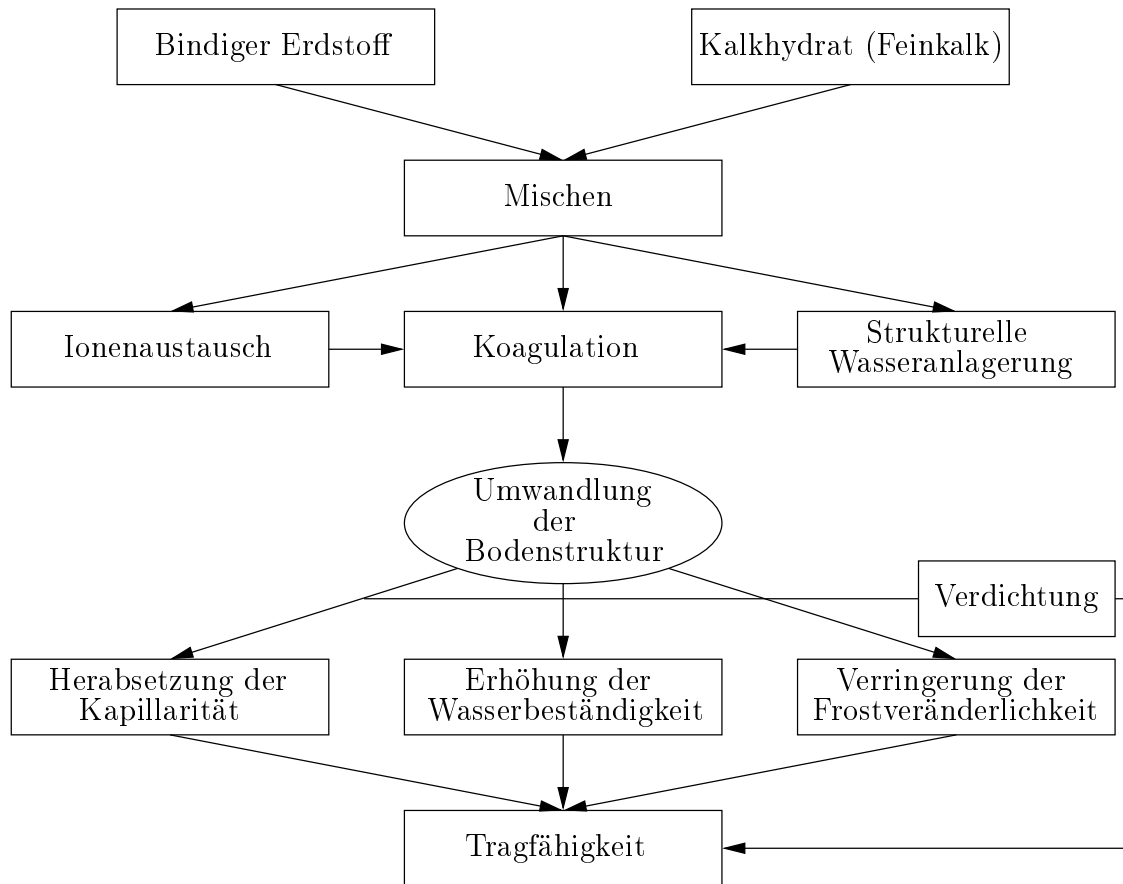


Bild 5.3: Wirkungsweise bei Bodenbehandlungen mit Kalk [66]

In Bild 5.3 sind die Wirkungsmechanismen der Sofortreaktionen dargestellt. In Abhängigkeit von der Kalkart und den im Erdstoff enthaltenen Tonmineralen dauern diese zwischen etwa 4 und maximal 72 Stunden [6].

5.1.2 Langzeitreaktionen

Die langfristige Stabilisierung von kalkbehandelten bindigen Erdstoffen beruht auf der carbonatischen und einer hydraulischen Erhärtung, sofern intensiv reaktionsfähige puzzolanische Bestandteile im Erdstoff vorhanden sind.

5.1.2.1 Hydraulische Erhärtung

Mit dem Ausklingen der Sofortreaktionen bildet sich Kalkhydratgel im Erdstoff, das Koagulate und feine Quarzteilchen verkittet und die Porenstruktur ändert. Aufgrund des sich einstellendes pH-Wertes von ≈ 12 , werden Silikate (SiO_2) und Aluminate (Al_2O_3) aus den Tonmineralen gelöst und füllen gelartig den Porenraum. Reagieren diese Lösungsprodukte mit den Calcium-Ionen, so entstehen Calcium-Silicat-Hydrate und Calcium-Aluminat-

Hydrate, die eine Zementierung der Erdstoffpartikel bewirken [36, 49, 70]. Diese puzzolanischen Reaktionen beginnen im Neolith-Stadium und können mehrere Jahre andauern. Kristallneubildungen aus der Gel-Masse hat *Brand* [3] nachgewiesen. In Bild 5.4 ist der zeitliche Ablauf des Reaktionsmechanismus der dauerhaften Verfestigung dargestellt.

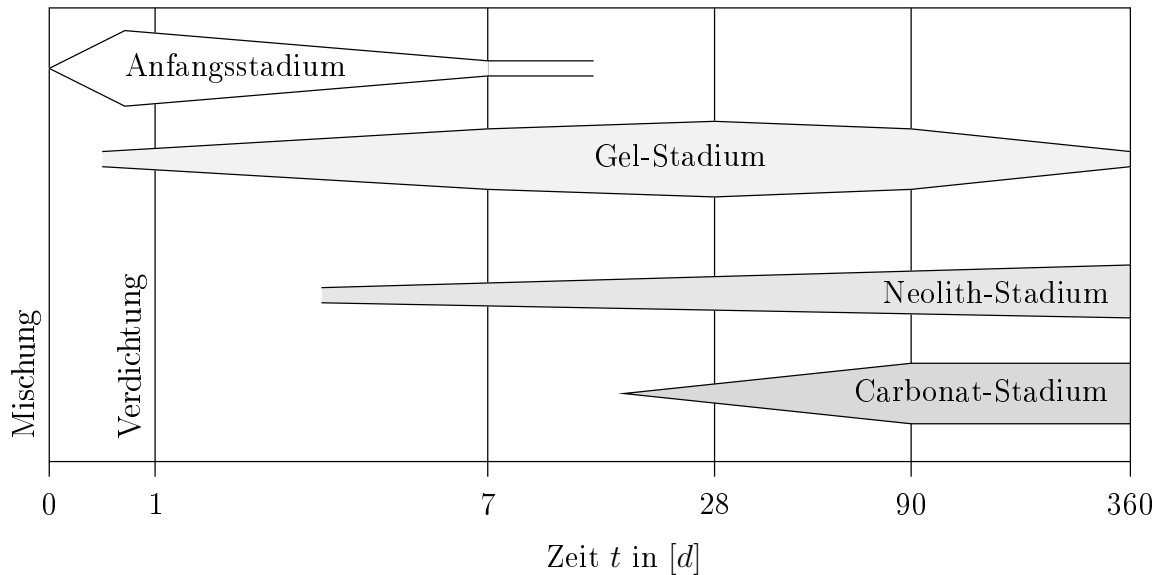


Bild 5.4: Entstehung der Reaktionsphasen bei Langzeitwirkung des Kalkes im Erdstoff [36]

Hydraulische Verfestigungen treten jedoch nicht nur durch Kristallisation der porenbefüllenden Gel-Masse auf, sondern können auch direkt an der Oberfläche der Tonminerale erfolgen. Hierbei verbleiben die Aluminate oder Silikate an den Rändern und Bruchflächen der Tonminerale, wo sie mit dem Kalk reagieren. Besonders die Reaktionen der Silanol-Gruppe können zu verfestigenden CSH-Phasen führen [29].

5.1.2.2 Carbonatische Erhärtung

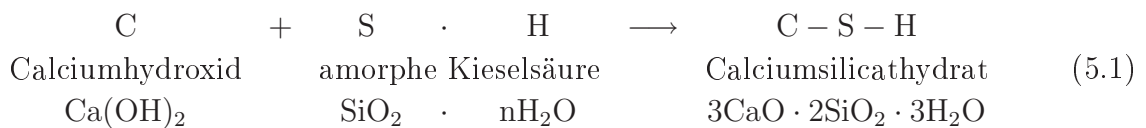
Das Kalkhydrat reagiert mit dem Kohlendioxid der Bodenluft unter Beteiligung des Porenwassers zu Calciumcarbonat, wie in Gleichung 4.3 dargestellt ist. Für baupraktische Zwecke kann die Carbonatisierung nachteilig wirken, da vereinzelt und ohne Verbund entstehende Carbonatkristalle zu einer Entfestigung der stabilisierten Oberfläche führen können [70]. Wird die verfestigte Schicht überbaut, steht in der Regel nicht genügend atmosphärisches Kohlendioxid zur Verfügung, sodass diese Langzeitwirkung keine wesentliche Bedeutung für die Verfestigung erlangt.

5.2 Hüttensand-Kalk-Reaktionen

Aufgrund der geringen Tonfraktion des Kalksteins bei der Herstellung von Luftkalken enthalten diese keine wirksamen Anteile an Hydraulikfaktoren (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3). Um diesen Kalken dennoch hydraulische Eigenschaften zu verleihen, werden hydraulische Zuschläge beigemischt. Hierzu zählen die Puzzolane, die entweder aus natürlichen Vorkommen stammen (Puzzolanerde, Santorinerde, Trass) oder als Industrienebenprodukte

(Flugaschen, Silicastaub, Ölschieferasche, Hüttensande) anfallen. Hüttensande nehmen hierbei eine Sonderstellung ein, da sie einen höheren Anteil an Calciumverbindungen aufweisen, die ihnen latent-hydraulische Eigenschaften verleihen.

Wesentliches Merkmal der Puzzolane ist das Vorhandensein von reaktionsfähiger Kieselsäure ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), die mit Calciumhydroxid zu festigkeitsbildenden Calciumsilicathydraten reagieren. In Gleichung 5.1 ist das Reaktionsprinzip dieser langsam verlaufenden Erhärtung dargestellt. Quarz, das Anhydrid der Kieselsäure, ist nicht in der Lage durch Wassereinwirkung bei normalen Druck- und Temperaturverhältnissen Kieselsäure zu bilden [35]. Bei größeren Anteilen an Aluminiumoxid können zusätzlich festigkeitssteigernde Calciumaluminathydrate gebildet werden.



In Bild 5.5 ist das Dreistoffsystem der anorganischen Bindemittel dargestellt. Infolge des geringen Calciumoxidgehaltes der natürlichen Puzzolane (i) reagieren diese nur in Verbindung mit Ca(OH)_2 und Gegenwart von Wasser zu CSH-Phasen. Im Gegensatz hierzu kann bereits eine alkalische Anregung durch OH^- -Ionen den Erhärtungsvorgang bei Hüttensanden (e und f) auslösen [40]. Bei Bodenverbesserungen mit Kalk liegen aufgrund der Dissoziation des Kalkhydrates anregende Hydroxyl-Ionen in der Bodenlösung vor.

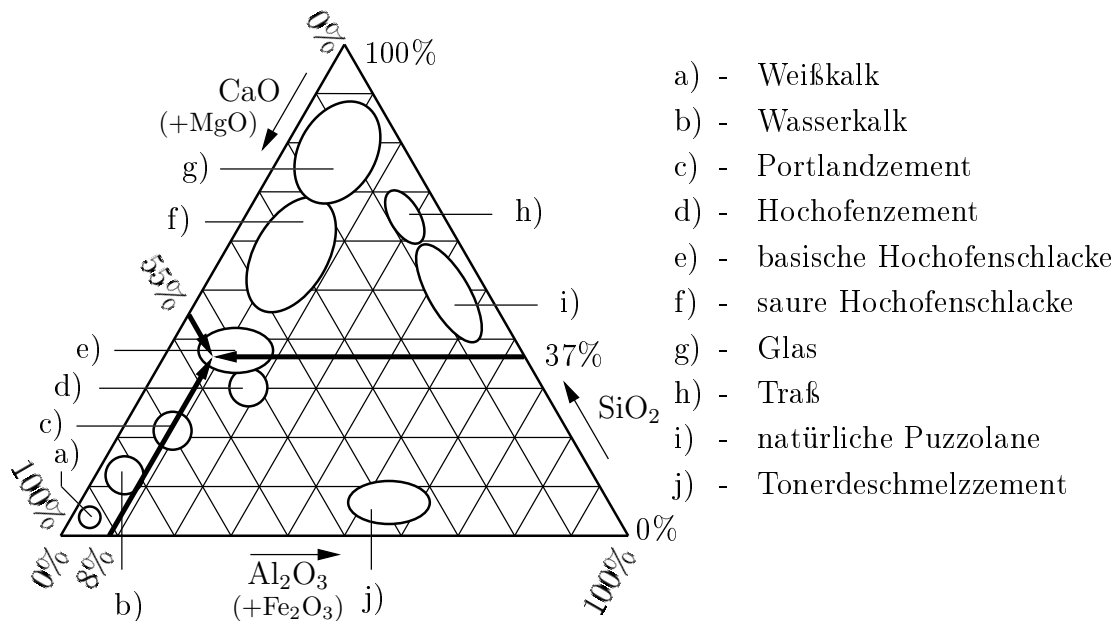


Bild 5.5: Zusammensetzung der anorganischen Baubindemittel auf Kalk- Silicat- und Aluminatbasis [35] und Einordnung des verwendeten Hüttensandes

Als latent-hydraulischer Zusatzstoff wurde der in Abschnitt 4.3 beschriebene Hüttensand verwendet. Mit energiedispersiver Röntgenfluoreszenzspektroskopie (EDXRF) konnte dessen Zusammensetzung bestimmt werden. Das Bild 5.5 zeigt die Einordnung des untersuchten Hüttensandmehls in das Dreistoffsystem.

Hiernach entspricht das verwendete Hüttensandmehl den Anforderungen an Hüttensande für Hochofenzemente nach *DIN 1164* [11], mit dem nach Gleichung 5.2 einzuhaltenden Massenverhältnis.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2} \geq 1 \quad (5.2)$$

Die latent hydraulischen Eigenschaften der Hüttensande steigen mit zunehmenden Glasgehalt, da der Energiegehalt dieses metastabilen Zustandes höher ist als der entsprechende kristalline Zustand [56]. Zusätzlich wird die Reaktivität durch die Temperatur, den pH-Wert der Lösung und die Korngröße beeinflusst. In Bild 5.6 ist die Körnungslinie des verwendeten Hüttensandmehls dargestellt. Die Korngrößenmessung der Partikel wurde hierbei mit einem Lasergranulometer durchgeführt.

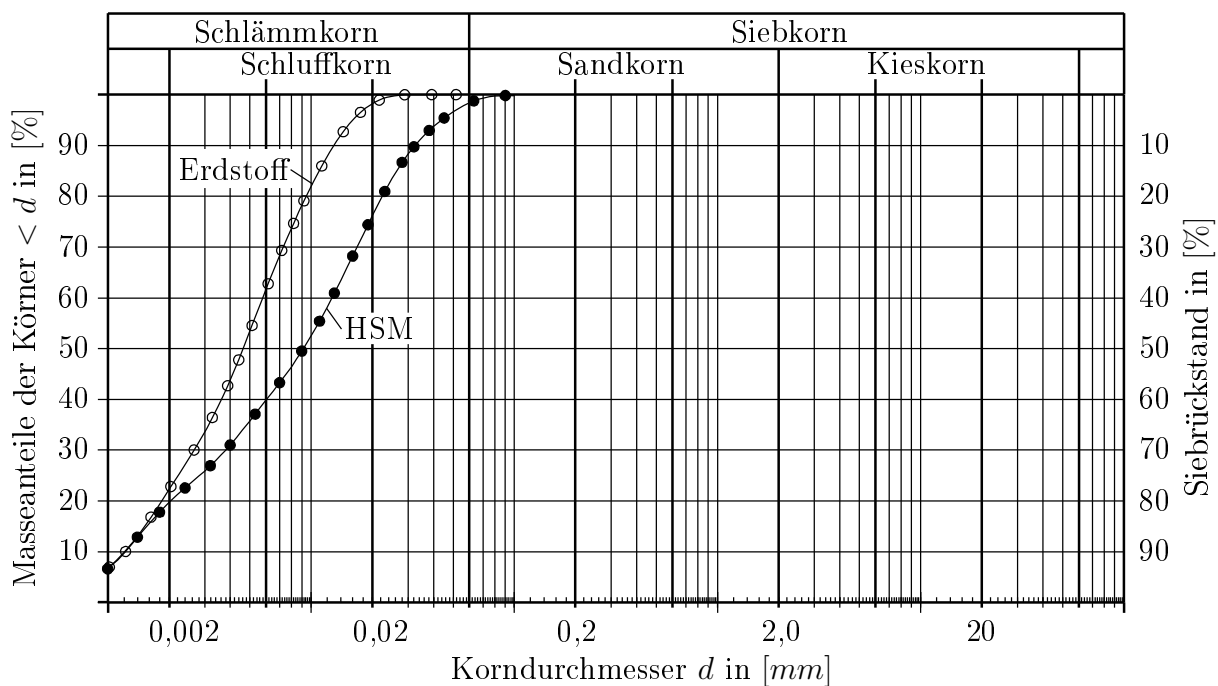


Bild 5.6: Vergleich der Körnungslinie des Hüttensandmehls (HSM) und des Erdstoffs

Die Korngrößen des Hüttensandes liegen überwiegend in der Schluffkornfraktion, wobei der Anteil an Mittel- und Grobschluff höher ist als beim verwendeten Erdstoff. Die Feinstanteile beider Ausgangsstoffen liegen bei etwa 20%, wodurch eine erhöhte Reaktionsfähigkeit, aufgrund der großen spezifischen Oberflächen, gegeben ist. Die Anlagerung von gelösten Hüttensandpartikeln an Tonmineralen ist aufgrund der ähnlichen Größenfraktionen zu erwarten.

Die zuvor beschriebenen Wirkungsmechanismen zwischen Kalk und Ton sowie zwischen Kalk und Hüttensand stellen die Grundlage für die zu erwartende Verfestigung und Klimabeständigkeit des Erdstoffs dar.

Kapitel 6

Experimentelle Untersuchungen

6.1 Probekörper

6.1.1 Überblick - Herstellung der Probekörper

Die Probekörperherstellung für die Bodenverfestigung mit Kalkhydrat erfolgte in den Vorversuchen nach den „Technischen Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau“ (TP BF-StB, Teil B 11.5). Der mit einer Haushaltsreibe zerkleinerte bindige Erdstoff wurde flächenhaft mit dem Bindemittel bestäubt und anschließend manuell durchmischt (vgl. Bild 6.1). Die Bindemittelmenge bezog sich hierbei jeweils auf die Erdstofftrockenmasse. Die Zugabemengen umfassten 2, 4 und 6 Masseprozent.



Bild 6.1: Flächige Bindemittelzugabe mit einem Sieb (links) und manuelles Mischen des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches (rechts)

Bereits mit dem ersten flächigen Kontakt des Bindemittels mit dem Erdstoff bildete sich eine Krümelstruktur aus. Eine anschließende 120 Sekunden dauernde maschinelle Vermengung in einem Mörtelmischer nach *DIN EN 196* [9] sowie eine einstündige Ruhephase optimierte die Verteilung und die Reaktion des Kalkes mit dem Erdstoff. Während der einstündigen Lagerung des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches in einem luftdicht verschließbaren Gefäß konnte bereits ein Temperaturanstieg verzeichnet werden. Ein zweiter, abschließender maschineller Mischprozess (siehe Bild 6.2, links) homogenisierte nochmals das reagierende Gemisch vor dessen Weiterverarbeitung.



Bild 6.2: Maschinelles Mischen des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches (links) und Verdichtung im programmierbaren Proctorgerät (rechts)

Die Probekörper wurden im Standardproctorzylinder ($h/d = 120/100\text{ mm}$) mit einem programmierbaren Proctorgerät (siehe Bild 6.2, rechts) hergestellt und verdichtet. Die gewählten Verdichtungsarbeiten entsprechen mit $W \approx 0,6\text{ MNm/m}^3$ der einfachen Standardproctorarbeit und mit $W \approx 1,2\text{ MNm/m}^3$ der doppelten Standardproctorarbeit. Abweichend von den Angaben in *DIN 18127* [16] wurden die Schlagzahlen für die einzelnen Einbauschichten differenziert und zwar von der untersten Schicht ansteigend gewählt. In Tabelle 6.1 sind die Parameter der Proctorkörperherstellung zusammengestellt. Mit dieser Maßnahme konnte eine einheitlichere Verdichtung des gesamten Probekörpers erzielt werden.

Tabelle 6.1: Parameter der Proctorkörperherstellung für einfache und doppelte Standardproctorarbeit

Schicht-Nr.		Schlagzahl			Fallhöhe	Fallgewicht
a)	b)	$n_{\text{gewählt}}$	n_{DIN}	Δn	h_f in [cm]	m in [kg]
1	1+2	22	25	-3	30	2,5
2	3+4	25	25	± 0	30	2,5
3	5+6	28	25	+3	30	2,5
a) Schichtnummern für die Verdichtungsarbeit $W \approx 0,6\text{ MNm/m}^3$						
b) Schichtnummern für die Verdichtungsarbeit $W \approx 1,2\text{ MNm/m}^3$						

Während der Herstellung der Proctorkörper wurde nach Fertigstellung jeder Einbaulage die Oberfläche aufgeraut, sodass eine Verzahnung mit der folgenden Schicht vorhanden ist. Da in den Technischen Prüfvorschriften [26] keine Aussage über die Art und den Grad der Aufrauhung getroffen wird, wurde diese mit einer Gabel mit aufgeweiteten Zinken vorgenommen.

Die Verdichtung der Proctorschichten konnte an Hand von Mehrfachversuchen so optimiert werden, dass jede untenliegende Einbaulage nach der Verdichtung die gleiche Höhe aufwies. Abweichend von den unteren Schichtdicken wurde die oberste Einbaulage mit den in [16] geforderten 10 mm Überstand gefertigt, dabei wurden die abschließenden fünf Schläge über eine aufgelegte Stahlplatte ausgeführt.

Nach der Verdichtung wurden die Probekörper mit einer hydraulischen Presse herausgedrückt. In den Vorversuchen kamen hierbei zwei unterschiedliche Ausbaumethoden zum Einsatz. Während des Ausbauvorganges wurde entweder ein Probekörper (gesamter Proctortopfinhalt) hergestellt oder drei kleinere, zylindrische Körper mit den Abmessungen $h/d = 120/35\text{ mm}$ aus dem Proctortopfinhalt gewonnen.

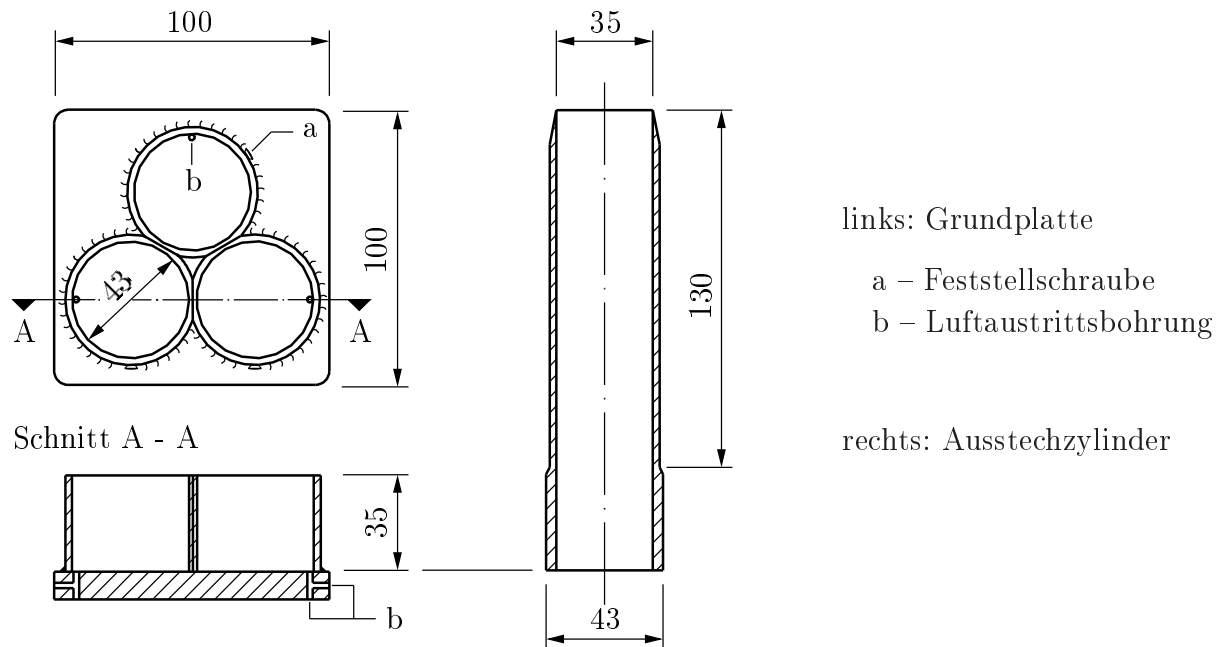


Bild 6.3: Dreifach-Ausstechapparat zur Gewinnung von 3 Probekörpern mit einem Durchmesser von $d = 35\text{ mm}$ aus dem Proctorkörper

Für die Herstellung dieser kleineren Probekörper wurde die in Bildern 6.3 und 6.4 dargestellte Dreifach-Ausstechapparat verwendet. Hierzu ist die Ausstechvorrichtung oberhalb der sich im Proctortopf befindenden verdichteten Probe fixiert worden. Anschließend wird die Probe aus dem Proctortopf in die Ausstechvorrichtung (vgl. Bild 6.4) gepresst.



Bild 6.4: Ausstechvorrichtung mit einem herausgenommenen Zylinder (links) und Ausstechvorgang aus dem Proctorkörper (rechts)

Die aus den Stahlzylindern herausgedrückten Probekörper werden anschließend auf eine

Höhe von $h = 75\text{ mm}$ gekürzt. Diese Abmessungen ergeben sich aus der zur Verfügung stehenden Triaxialzelle, den Angaben zur Ermittlung der Scherfestigkeit für schlanke Probekörper aus feinkörnigem Erdstoff nach *DIN 18137* [19] sowie den Angaben für einaxiale Druckfestigkeitsprüfungen nach *DIN 18136* [18].

6.1.2 Lagern der Probekörper

Die Lagerung der Proben fand in einem programmierbaren Klimaschrank mit Temperatur- und Luftfeuchteregeleung statt. Während der ersten sieben Tage wurden die luftdicht verpackten Körper bei einer Temperatur von 40°C und einer relativen Luftfeuchte von 98% gelagert. Die, im Vergleich zur normalen Umgebungstemperatur, erhöhte Temperatur führt zu einer Beschleunigung der im Erdstoff-Kalk-Gemisch ablaufenden Reaktionen. Die weitere Lagerung erfolgte in Abhängigkeit von den vorgesehenen Prüfungen wiederum im Klimaschrank, jedoch im unverpackten Zustand und mit geänderten klimatischen Bedingungen. Die Probekörper wurden nach 7 Tagen entweder 12 Frost-Tau-Wechseln in einem Temperaturbereich von $+20^\circ\text{C}$ bis -20°C ausgesetzt, oder verblieben bis zum gewählten Zeitpunkt der Festigkeitsprüfung bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 98% im Klimaschrank.

6.1.3 Einaxiale Druckversuche

Die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit gibt Aufschluss über das Verfestigungspotential und die Klimabeständigkeit des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches. Einaxiale Druckfestigkeitsprüfungen sind nach den Technischen Prüfvorschriften [26] nur für Bodenverfestigungen nach 12 Frost-Tau-Wechseln in einem Alter von 28 Tagen durchzuführen. Abweichend von diesen Vorgaben wurde in den Vorversuchen die einaxiale Druckfestigkeit auch für Probekörper ohne Frostbelastung ermittelt.

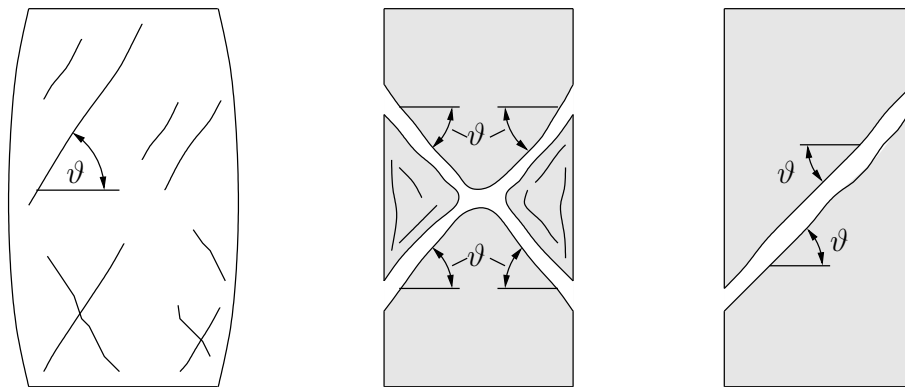


Bild 6.5: Schematische Bruchbilder bei einaxialen Druckversuchen

In Bild 6.5 sind übliche Versagensbilder für Bruchzustände bei einaxialer Belastung ohne seitliche Verformungsbehinderung dargestellt. Je nach Festigkeit und innerer Struktur des Erdstoffes bilden sich Ausbauchungen, Scherbrüche oder Spaltbrüche infolge Keilwirkung aus.

In den Vorversuchen wurden zuerst Untersuchungen ohne Frost-Tau-Wechsel vorgenommen. Aufgrund der durch die Bindemittelzugabe hervorgerufenen Verfestigung und des Prüfalters von 28 Tagen wurden Versagenszustände in Form von Sprödb Brüchen erwartet.

Um annähernd gleichbleibende Gefüge des stabilisierten Erdstoffes innerhalb einer Prüfserie (3 Probekörper) zu gewährleisten, schien die Herstellung der Probekörper mit der 3-fach Ausstechapparatur als geeignetes Mittel Strukturschwankungen zu minimieren. Die Prüfergebnisse der Vorversuche wichen jedoch stark von diesen theoretischen Annahmen ab. Nicht nur die einaxialen Bruchspannungen σ_u variierten in großen Bereichen, sondern auch die Bruchbilder (siehe Bild 6.6) differierten ungewöhnlich in ihren Versagensmechanismen.

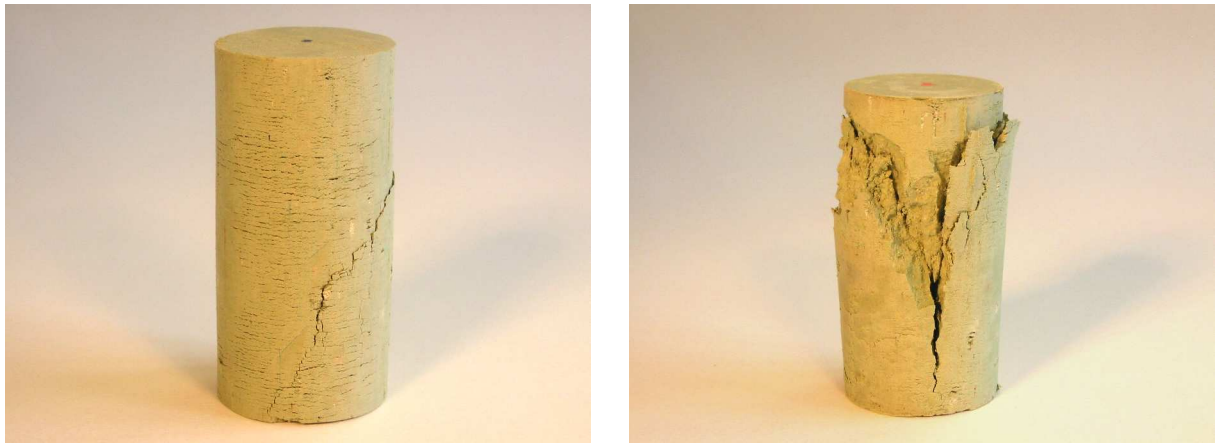


Bild 6.6: Probekörper mit den Abmessungen $h/d = 75/35 \text{ mm}$ nach einaxialem Druckversuch: Scherbruch (links) und Spaltbruch (rechts)

Diese Unterschiede im Bruchverhalten sind durch die Herstellungstechnologie der Probekörper bedingt. Die in Bild 6.7 (links) dargestellte Proctorhammerführung mit Überschneidungen führt zur Ausbildung von unterschiedlich verdichteten Zonen im Inneren des Proctorkörpers. In Bild 6.7 (rechts) sind die 3 Proctorschichten bei Standardproctorerstellung und die zugehörigen Verdichtungsverteilungen zu erkennen. Die hellen Fälichen stellen hierin Zonen hoher Verdichtung dar.

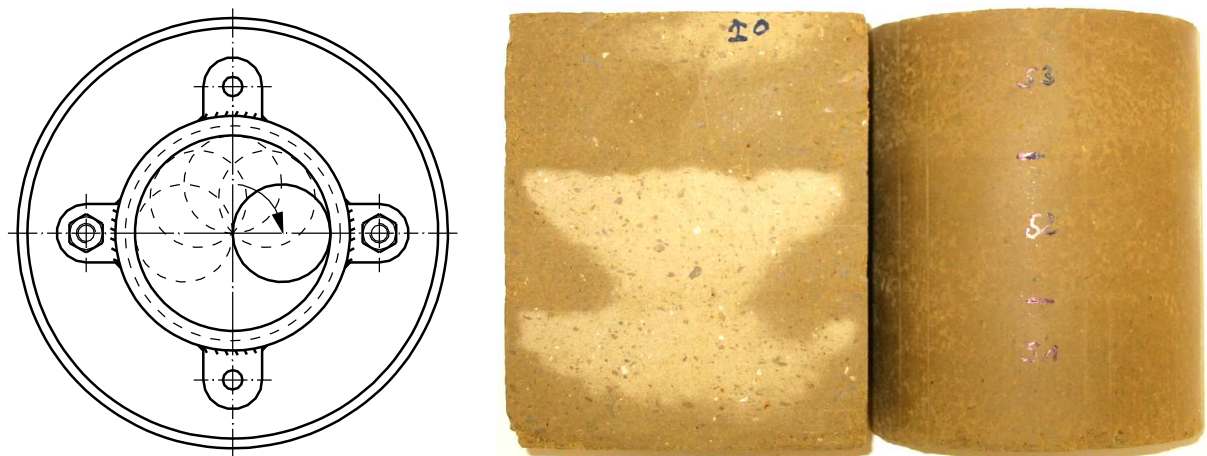


Bild 6.7: Schematische Proctorhammerführung mit Überschneidungen (links) und Verdichtungs zonen im aufgeschnittenen Proctorkörper (rechts)

Im Randbereich jeder neuen Einbaulage trat die jeweils geringste Verdichtung auf. Diese Tatsache konnte auch äußerlich festgestellt werden, da bei den Probekörpern noch visuell die Krümelstruktur des Ausgangsgemisches zu erkennen war. Die oberste Schicht wies aufgrund der herstellungsbedingten Überhöhung den durchgängig geringsten Verdichtungsgrad auf.

Die, mit der zuvor beschriebenen Herstellungstechnologie, gewonnen 3 Proben je Proctorkörper wiesen einerseits annähernd gleiche Bindemittelverteilungen auf, jedoch andererseits sehr differierende Verdichtungs- bzw. Dichtebereiche. Zusätzlich beeinflusste die Längenreduzierung der Probekörper auf 75 mm die Versuchsergebnisse, da der Verdichtungsgrad bzw. der Dichtebereich unmittelbar von der vertikalen Positionierung der Proben innerhalb des Proctorkörpers (siehe Bild 6.8) abhängig ist. Die Festigkeiten und Bruchbilder korrelierten mit den Dichtebereichen, sodass eine Vergleichbarkeit der Proben untereinander, obwohl sie aus dem gleichen Proctorkörper hergestellt wurden, nicht gegeben war.

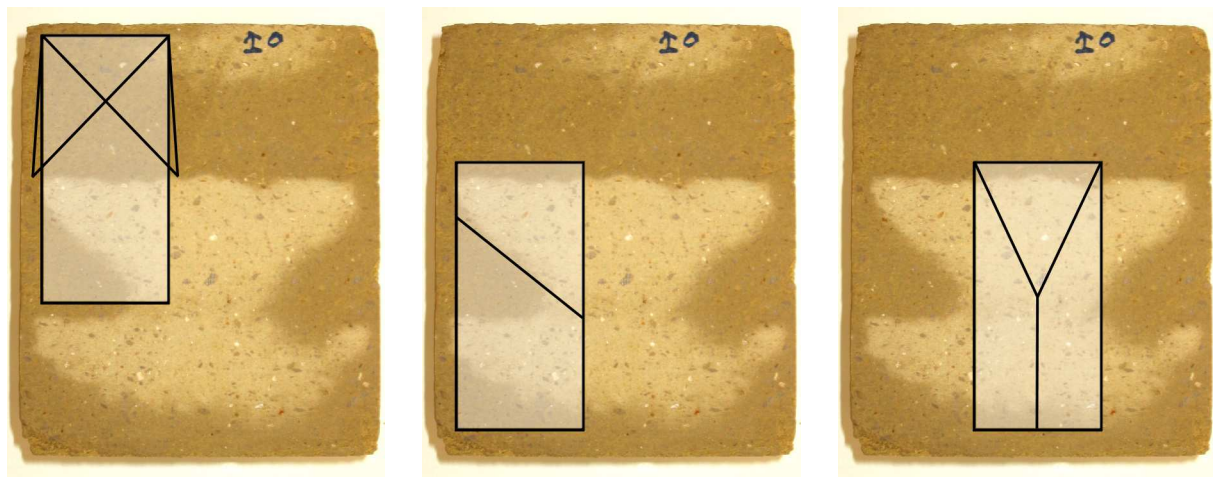


Bild 6.8: Probekörper mit sich einstellenden Bruchbildern infolge unterschiedlicher Dichtebereiche im Proctorkörper

6.1.4 Frostbeanspruchung

Die anschließenden Frost-Tau-Wechsel fanden daher in den Vorversuche nur an Proctorkörpern mit den Abmessungen $h/d = 120/100\text{ mm}$ statt. Die Proben waren entsprechend den Vorgaben nach [26] 12 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. In Bild 6.9 ist der Temperaturverlauf eines Belastungszyklus dargestellt. Die zeitliche Abstimmung wurde so gewählt, dass nach Abschluss aller Frost-Tau-Wechsel die Prüfkörper ein Alter von 28 Tagen aufwiesen. Die Massenermittlung erfolgte je Zyklus jeweils unmittelbar vor Beendigung der Frost- und der Auftauphase (siehe Markierungen in Bild 6.9).

In Bild 6.10 sind die verwendeten Probekörper während der Frostphase (links) und der Auftauphase (rechts) im Klimaschrank dargestellt. Um ein flächiges Festfrieren der Probenstrinseiten mit der Unterlage zu verhindern, erfolgte die Lagerung in der Frostphase auf Gummistopfen. Nach Beendigung der Frostbelastung wurden die Körper um 180° gedreht, sodass folgend die kopfseitige Stirnfläche als Aufstandsfläche fungierte. Während

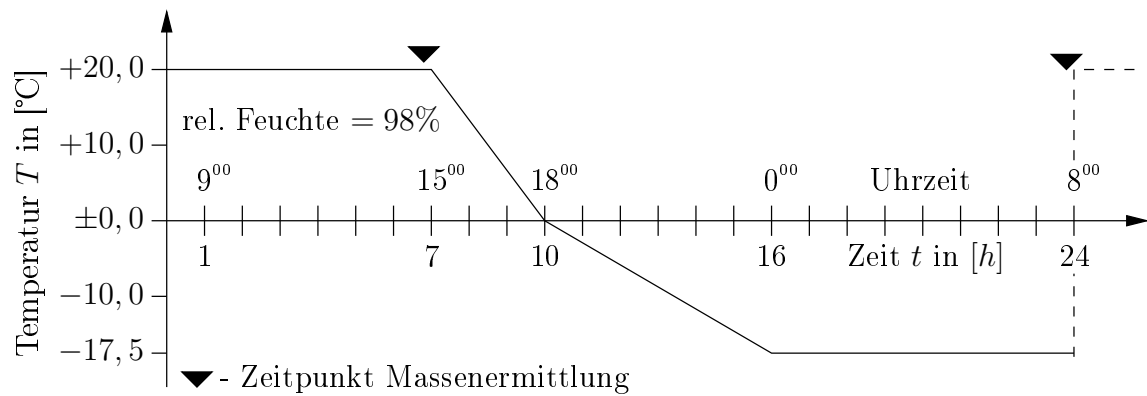


Bild 6.9: Programmierter 24 stündiger Frost-Tau-Zyklus des Klimaschranks

des Auftauvorganges, auf einer im Wasserbad gelagerten Filzmatte, nehmen die Probekörper Wasser auf. Der Wasserstand entsprach etwa $3/4$ der Höhe der Filzmatte. Durch den zyklischen alternierenden Wechsel der Standfläche wurde gewährleistet, dass eine zweiseitige Durchfeuchtung der Probekörper stattfand. Hierdurch waren sowohl die unterste Einbaulage als auch die im allgemeinen geringer verdichtete oberste Einbaulage extremen Frostbeanspruchungen ausgesetzt.



Bild 6.10: Proctorkörper während des Frost-Tau-Wechsels: Frostphase (links) und Auftauphase auf wassergesättigter Filzmatte (rechts)

Je nach gewählter Verdichtungsarbeit und des Bindemittelanteils variiert die Intensität der Rissbildung. Im gefrorenen Zustand treten die ausgeprägtesten Risse an den Schichtgrenzen auf. In Bild 6.10 zeichnen sich sowohl für den gefrorenen als auch für den aufgetauten Zustand der Probekörper die Einbaulagen (Dichtebereiche) deutlich ab.

Infolge der nicht optimal verdichteten Mantelzonen im Schichtgrenzenbereich und des hierdurch bedingt vergrößerten Wasseraufnahmevermögens kommt es bei Frostbeanspruchungen zu verbundzerstörenden Frosthebungen. Die radial an den Schichtgrenzen auftretenden Risse dringen mehrere Millimeter in die Probekörper ein.

Da in der Praxis eine vollflächige Walzenverdichtung erfolgt, weist das verfestigte Planum oder der verfestigte Unterbau eine gleichmäßigere Flächendichte als der Proctorkörper auf. Verbundzerstörende seitliche Frostangriffe infolge minder dichter Mantelzonen treten im

Inneren des Planums im Allgemeinfall nicht auf. Um die natürlichen Randbedingungen besser zu erfassen, wurde die nicht optimal verdichtete Mantelschicht nach dem Frost-Tau-Wechsel entfernt.

Um nur geringe Dichteabweichungen innerhalb eines Probekörpers zu gewährleisten, wurde nachfolgend nur der Kernbereich des Proctorkörpers als Probe genutzt. Die Abmessungen des Kernkörpers sind in Anlehnung an [18] für schlanke Probekörper mit $h/d = 120/60\text{ mm}$ gewählt worden, was einem Schlankheitsgrad von 2 entspricht.

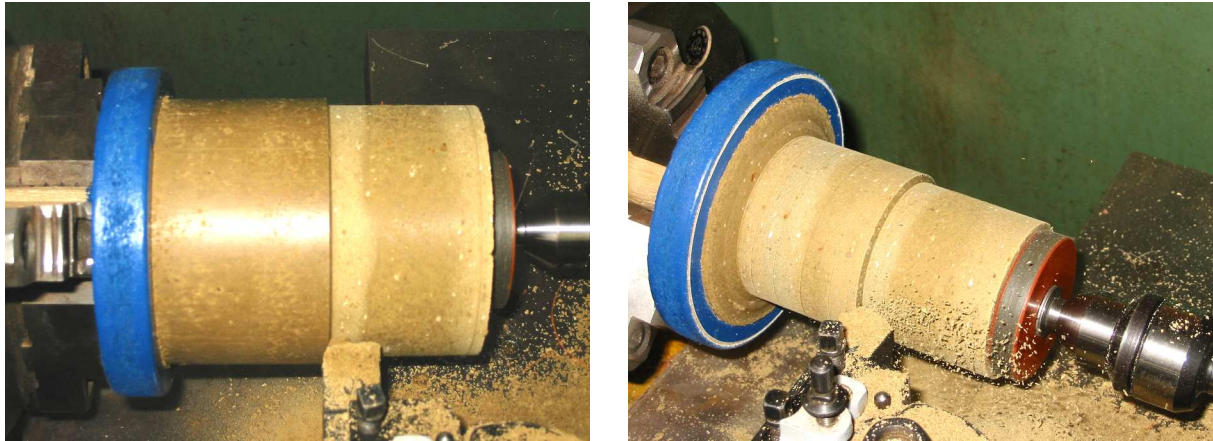


Bild 6.11: Anpassung des Schlankheitsgrades der Probekörper durch maschinelles Abdrehen auf $h/d = 120/60\text{ mm} = 2$

Die Anpassung des Schlankheitsgrades erfolgte durch Abdrehen der Mantelfläche der Probekörper in einer Drehbank. In Bild 6.11 sind wiederum die herstellungsbedingten unterschiedlichen Verdichtungsgebiete (helle und dunkle Zonen) zu erkennen. Mit fortschreitendem Materialabhub glichen sich die Dichtebereiche an. Trotz zum Teil stark gerissener Proben nach dem Frost-Tau-Wechsel konnte in allen Fällen der Kernbereich ohne Zerstörungen ausgearbeitet werden.

Mit der Änderung der Schlankheit wurden aus den gedrunenen Proctorkörpern mit $h/d = 1,2$ schlanke Probekörper mit $h/d = 2,0$. Bei den folgenden einaxialen Druckfestigkeitsprüfungen ist deshalb die Verformungsgeschwindigkeit mit $0,2\%/min$ der Probenanfangshöhe nach [18] gewählt worden. Mit der Verwendung der Kernkörper glichen sich sowohl die Bruchbilder als auch die Bruchfestigkeiten besser an, obwohl auch weiterhin noch vereinzelte Ergebnisabweichungen auftraten.

Um eine gleichmäßige Dichteverteilung in den Probekörpern zu erzielen, wurde daher für weitere Untersuchungen eine veränderte Prüfkörperherstellung vorgeschlagen.

6.1.5 Modifiziertes Herstellen der Probekörper

Zur Herstellung der Probekörper mit dem Schlankheitsgrad $h/d = 2$ wurde die in Bild 6.12 dargestellte Zylinder-Stempel-Konstruktion gewählt. Der Innendurchmesser d des Stahlzylinders beträgt 60 mm und die Innenhöhe h beträgt mit eingesetzten Stempeln 120 mm , sodass die Probekörper die gleichen Abmessungen wie die zuvor dargestellten abgedrehten Proctorkörper besitzen.

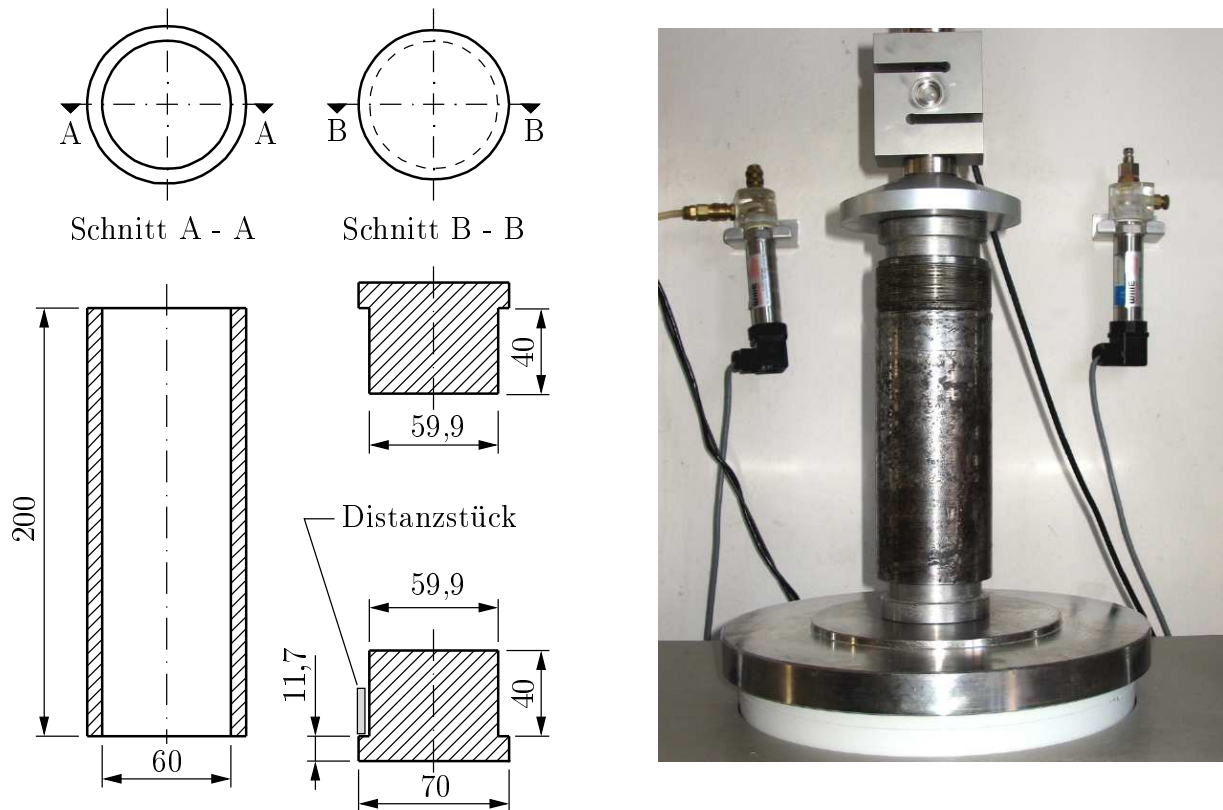


Bild 6.12: Zylinder-Stempel-Konstruktion zur Herstellung von Probekörpern mit den Maßen $h = 120\text{ mm}$ und $d = 60\text{ mm}$ (links) und Verdichtungsvorgang durch Einpressen der Stempel (rechts)

Die Herstellung der Probekörper erfolgte analog zur Standardherstellung im Proctortopf in 3 Einbaulagen. Die Bindemittelzugabe und die Behandlung des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches wurde analog der Vorgehensweise für die Standardmethode im Proctortopf gewählt. Die Masse des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches je Einbauschicht wurde anhand der maximalen Feuchtdichte $\varrho_{f,max}$ aus den zuvor durchgeführten Proctorversuchen ermittelt. Die nachstehende Beispielrechnung mit der Feuchtdichte $\varrho_{f,max} = 1,9\text{ g/cm}^3$ verdeutlicht die Vorgehensweise der Massenermittlung.

Beispielrechnung:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{Zyl}} &= \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h = \frac{\pi \cdot (6\text{ cm})^2}{4} \cdot 12\text{ cm} = 339,29\text{ cm}^3 \\
 m_{\text{Gemisch,Zyl}} &= \varrho_{f,max} \cdot V_{\text{Zyl}} = 1,9\text{ g/cm}^3 \cdot 339,29\text{ cm}^3 = 644,65\text{ g} \\
 m_{\text{Gemisch,Schicht}} &= \frac{m_{\text{Gemisch,Zyl}}}{n_{\text{Schichten}}} = \frac{644,65\text{ g}}{3} = 214,88\text{ g}
 \end{aligned}$$

Für die Herstellung der Probekörper wurde ein etwa 2 cm hohes Distanzstück auf den Rand des unteren Stempels der Zylinder-Stempel-Konstruktion (siehe Bild 6.12) gestellt. Zur Verminderung der Reibung wurde die innere Wandung des Zylinders durchgehend mit einer dünnen Schicht Vaseline versehen und der Zylinder über den Stempel auf das Distanzstück geführt. Die zuvor berechnete Schichtmasse wurde anschließend in den Zylinder eingefüllt und mit dem in Bild 6.13 dargestellten schafffußwalzenähnlich wirkenden Stampfer vorverdichtet.

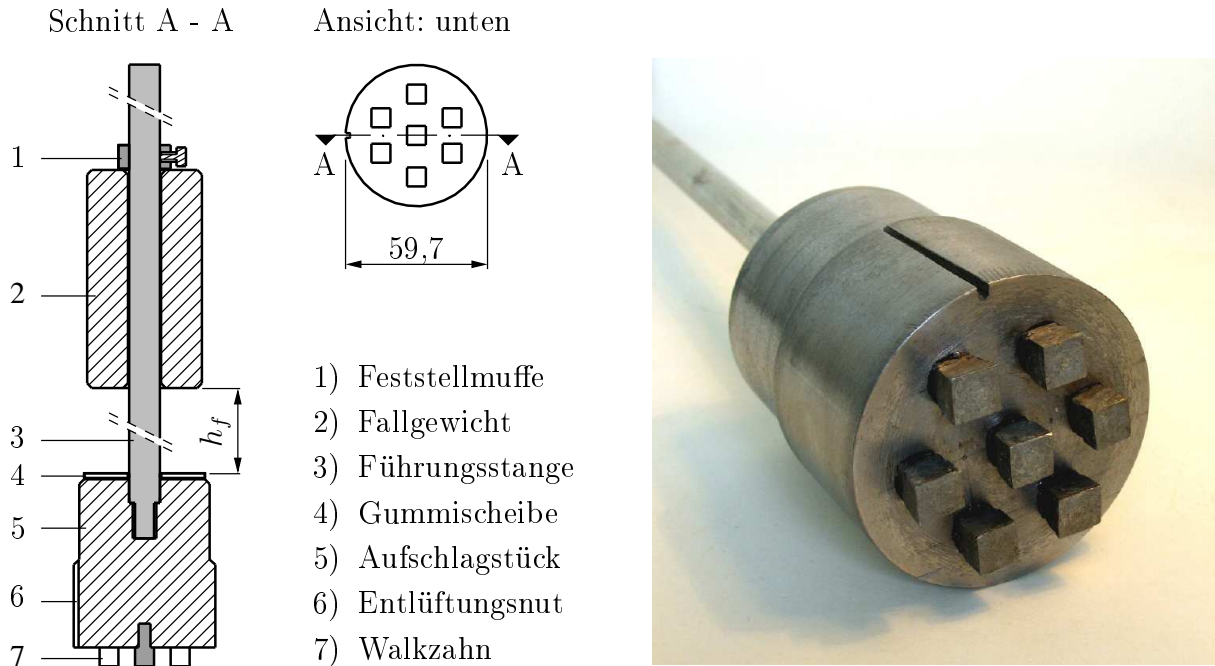


Bild 6.13: Eigenentwickeltes Verdichtungsgerät mit Fallgewicht (links) und Detail Aufschlagstück mit Walkzähnen (rechts)

Nach jedem Schlag wird das bezahnte Aufschlagstück rotierend versetzt, sodass eine Knet- und Walkwirkung eintritt. Durch die passgenaue Führung des Stampfers im Zylinder wird eine einheitliche und vollflächige Vorverdichtung erzeugt und es bildete sich eine gut verzahnungsfähige Schichtoberfläche aus. Diese Vorgehensweise wurde für alle 3 Einbauschichten beibehalten. Die Anzahl der Verdichtungsschläge je Schicht wurde so gewählt, dass nach Fertigstellung der 3. Einbaulage und Aufsetzen des oberen Stempels ein etwa 2 cm großer Abstand zwischen Zylinderabschluss und Stempelrand besteht. Für die verwendeten Erdstoff-Bindemittel-Gemische eignen sich Vorverdichtungen mit aufsteigende Schlagzahlen von 3, 4 und 5 Schlägen für die angestrebte Standardproctorarbeit von $W = 0,6\text{ MNm}/\text{m}^3$ und 4, 5 und 6 Schlägen für die doppelte Proctorarbeit von $W = 1,2\text{ MNm}/\text{m}^3$. Nachfolgend wird das untere Distanzstück entfernt und die Zylinder-Stempel-Konstruktion in eine einaxiale Prüfpresse eingebaut. Zur Verbesserung der Verdichtungshomogenität wird nun jeweils ein 1 cm hohes Distanzstück zwischen unterem Stempel und Zylinder und oberem Stempel und Zylinder eingesetzt und die Presse bis zum Erreichen dieser Abstände manuell eingerichtet. Die endgültige Verdichtung erfährt der Probekörper nach Wegnahme der Distanzstücke durch beidseitiges Einpressen der Stempel (siehe Bild 6.12, rechts) bis zur Endlage. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde mit dem maximalen Vorschub der verwendeten Presse von $5\text{ mm}/\text{min}$ gewählt.

6.1.6 Vergleich der Verfahren

Die Unterschiede zwischen den Herstellungsweisen werden schon während der Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen deutlich. Hier wirkt sich vor allem das Vorhandensein von unterschiedlichen Verdichtungsbereichen in den Proctorkörpern nachteilig aus.



Bild 6.14: Wasseraufnahme der Proben während der Auftauphase (oben) und Probekörper nach Beendigung der Frost-Tau-Wechsel (unten) - herkömmliches Verfahren (links), neues Verfahren (rechts)

In der Auftauphase des Frost-Tau-Wechsels wird durch die nicht optimal verdichteten Mantelzonen ein kapillarer Wassertransport ausgelöst. Infolge der in Bild 6.7 dargestellten herstellungsbedingten Dichteverteilung findet eine verstärkte Wassereinlagerung im Bereich der Mantelfläche zwischen den Einbaulagen statt. Hierdurch werden während der

Frostphase strukturzerstörende Frosthebungen ausgelöst. Die hervorgerufene horizontale Rissbildung an den Schichtgrenzen vermindert den kapillaren Transport zu jeder weiteren Einbaulage, sodass die Wassersättigung im Mantelbereich stufenweise abnimmt. In Bild 6.14 (oben links) zeichnen sich deutlich die 3 unterschiedlich stark wassergesättigten Einbauschichten ab. Die, nach Beendigung des Frost-Tau-Wechsels, ausgeprägten horizontalen Risse zwischen den Einbaulagen reichen tief in den Körper hinein. Ein vollkommener Abriss einer Proctorschicht konnte nach den Frost-Tau-Versuchen jedoch nicht festgestellt werden.

Zum Vergleich sind in Bild 6.14 (rechts) die druckverdichteten Probekörper nach den gleichen Frost-Tau-Beanspruchungen dargestellt. Bei diesen Proben treten keine unterschiedlichen Durchnässungen und Risse auf, was auf eine gleichmäßige Dichteverteilung des Körpers schließen lässt und durch das oberflächlich verteilte, einheitliche Rissbild gestützt wird.

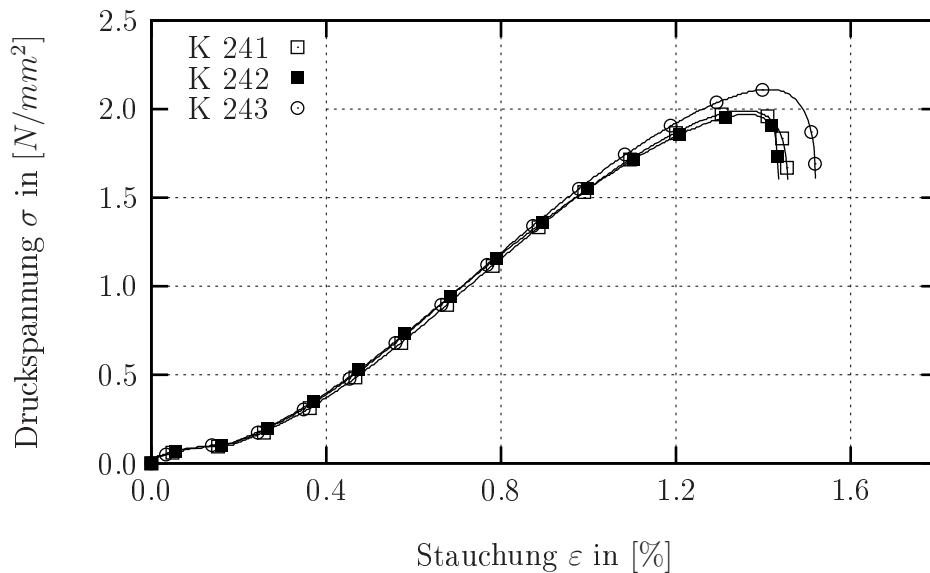


Bild 6.15: Einaxiale Druckfestigkeit q_u der Probekörper $K221 - 223$ nach 12 Frost-Tau-Wechseln

In Bild 6.15 sind die einaxialen Druckfestigkeiten für 3 Probekörper mit gleichen Erdstoff-Bindemittel-Anteilen nach den in [26] vorgeschriebenen 12 Frost-Tau-Wechseln dargestellt. Die nahezu identischen Festigkeiten bestätigen die sehr gute Homogenität der druckverdichteten Probekörper. Vor allem die in Bild 6.16 dargestellten Masseverläufe, mit Massezunahme in der Auftauphase und Masseverlust in der Frostphase, widerspiegeln die gleichmäßige Dichteverteilung innerhalb des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches und die hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse zeigt sich, dass das in Abschnitt 6.1.5 beschriebene Verfahren zur Probekörperherstellung bei Erdstoffstabilisierungen besser geeignet ist als die herkömmlichen Herstellungsmethode der Probekörper im Proctortopf. Bereits *Kézdi* [36] weist 1973 auf Vorteile von statischen Verdichtungen bei Prüfverfahren von Bodenstabilisierungen hin und auch *Jessberger* verwendet 1992 in [33] druckverdichtete Proben, jedoch ohne schichtweisen Einbau und ohne Vorverdichtung.

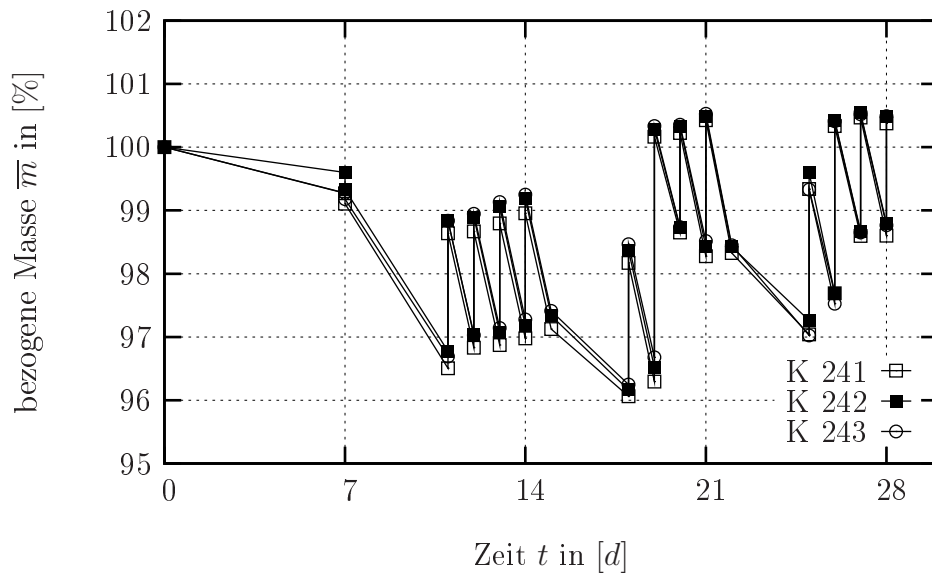


Bild 6.16: Masseverlauf der Probekörper K221 – 223 mit Frost-Tau-Wechseln

Die Vorteile des vorgeschlagenen Verfahrens liegen in

- einer praxisnäheren Erdstoffverdichtung,
- einer vollflächigen Vorverdichtung der Einbaulagen,
- einer besseren Reproduzierbarkeit von Ergebnissen,
- einem besserem Verbund zwischen den einzelnen Schichten sowie
- der geringeren und gleichmäßigeren Verteilung des Rissbildes im ganzen Probekörper nach den Frost-Tau-Wechseln.

In Anbetracht der Vorteile des modifizierten Herstellungsverfahrens wurde dieses für die weiteren Untersuchungen gewählt.

6.2 Erdstoff-Bindemittel-Gemische

6.2.1 Erdstoff

Der in dieser Arbeit untersuchte Erdstoff stammt von einer Baumaßnahme auf dem Campus-Gelände der Hochschule Wismar. Das bindige Erdstoffmaterial wurde aus einer Tiefe von etwa 3 m unterhalb der Geländeoberfläche entnommen. Der Erdstoff, mit einem natürlichen Wassergehalt w_n von etwa 36 %, wurde anschließend mit einer Haushaltsreibe mechanisch zerkleinert. Um Wassergehaltsänderungen zu vermeiden, wurde das aufgearbeitete Material in luftdicht verschließbaren Großgefäßen gelagert. Für die durchgeführten Untersuchungen wurden jeweils Teilmengen von diesem Vorrat entnommen. Zur Regulierung des Wassergehaltes von Teilproben erfolgte entweder eine Trocknung im Trockenschrank oder eine Befeuchtung mit einem Wasserzerstäuber bei gleichzeitiger Durchmischung des Erdstoffs. Die Einwirkzeit des Wassers bei Befeuchtung des Erdstoffs betrug minimal 24 Stunden. Die Trocknungstemperatur wurde auf maximal 40°C begrenzt, um strukturelle Umwandlungen in den Tonmineralen zu verhindern.

6.2.1.1 Kenngrößen

Die Partikelgrößenbestimmung des Erdstoffs wurde sowohl mit dem Verfahren der Sedimentation nach *DIN 18123* [15] als auch nach dem Prinzip der Laserbeugung durchgeführt. Die in Bild 6.17 dargestellte Kornverteilung wurde von der Materialprüfanstalt Braunschweig mit einem Lasergranulometer CILAS 1064 ermittelt. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Probe aufgrund der Ultraschallbehandlung nahezu vollständig dispergiert und somit eine genauere Bestimmung der Feinstanteile möglich ist [45].

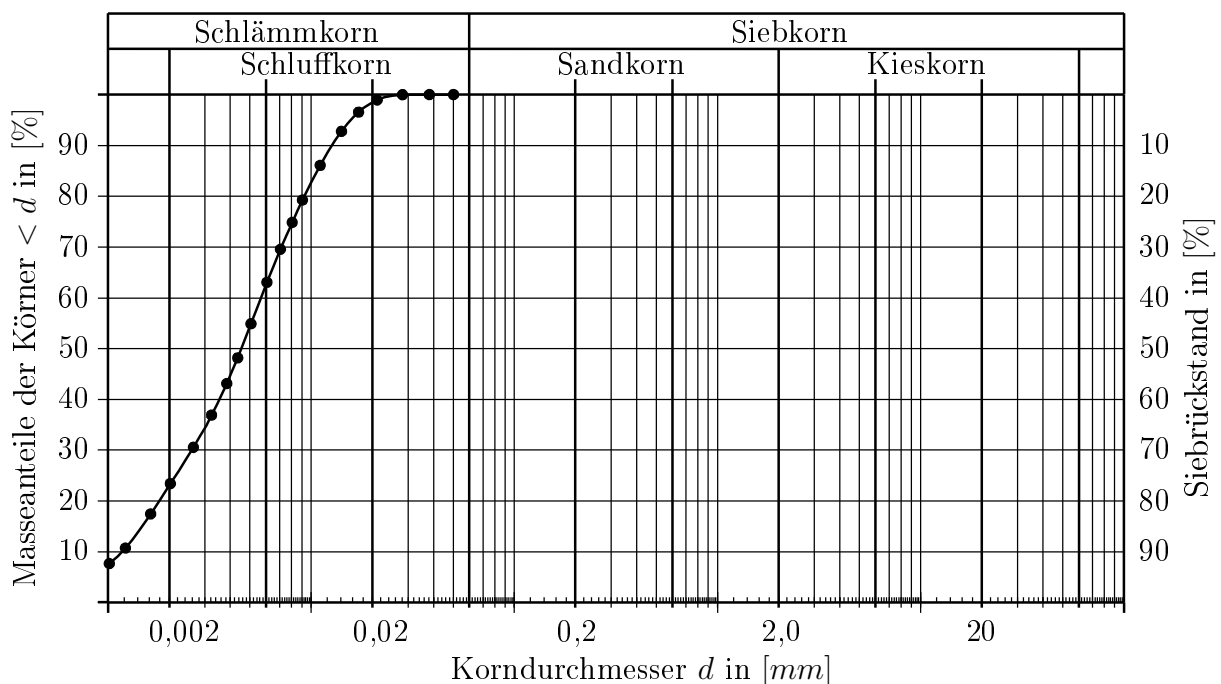


Bild 6.17: Körnungslinie des untersuchten Erdstoffs (MPA Braunschweig)

Die dargestellte Körnungslinie ist typisch für einen tonigen Schluff. Da die Eigenschaften von bindigen Böden durch ihre Plastizität bestimmt werden, ist die Klassifizierung feinkörniger Böden anhand des Plastizitätsdiagramms nach *DIN 18196* [20] vorzunehmen. Hierfür ist es notwendig, die Zustandsgrenzen nach *Atterberg*, d.h. die Übergänge von einer in die andere Zustandsform, zu ermitteln. Aus Bild 6.18 ergibt sich die Fließgrenze w_L des Erdstoffs zu 60,3%. Die Ausrollgrenze w_P wurde nach *DIN 18122* mit 27,1% bestimmt.

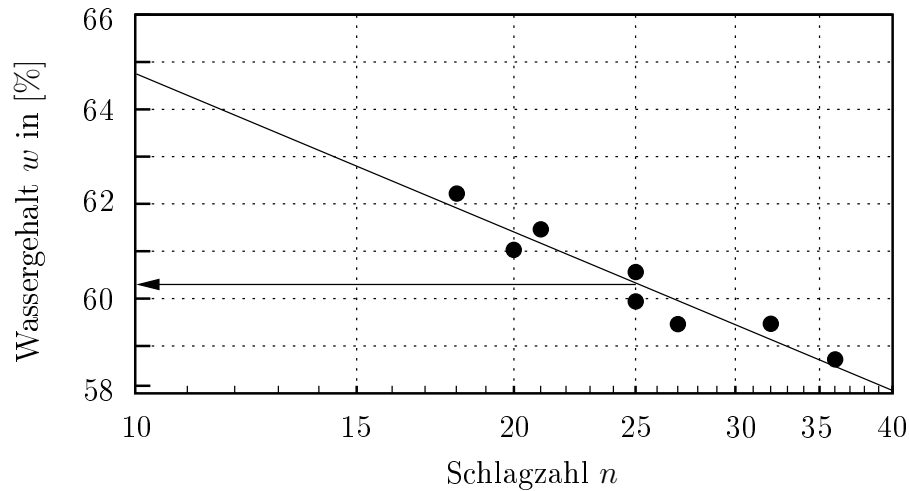


Bild 6.18: Bestimmung der Fließgrenze w_L mit dem Fließgrenzengerät nach *Casagrande*

Aus den ermittelten Grenzen des Bildsamkeitsbereichs wird der Erdstoff nach dem Plastizitätsdiagramm in Bild 6.19 als ausgeprägt plastischer Ton mit der Kurzbezeichnung TA nach *DIN 18196* eingestuft.

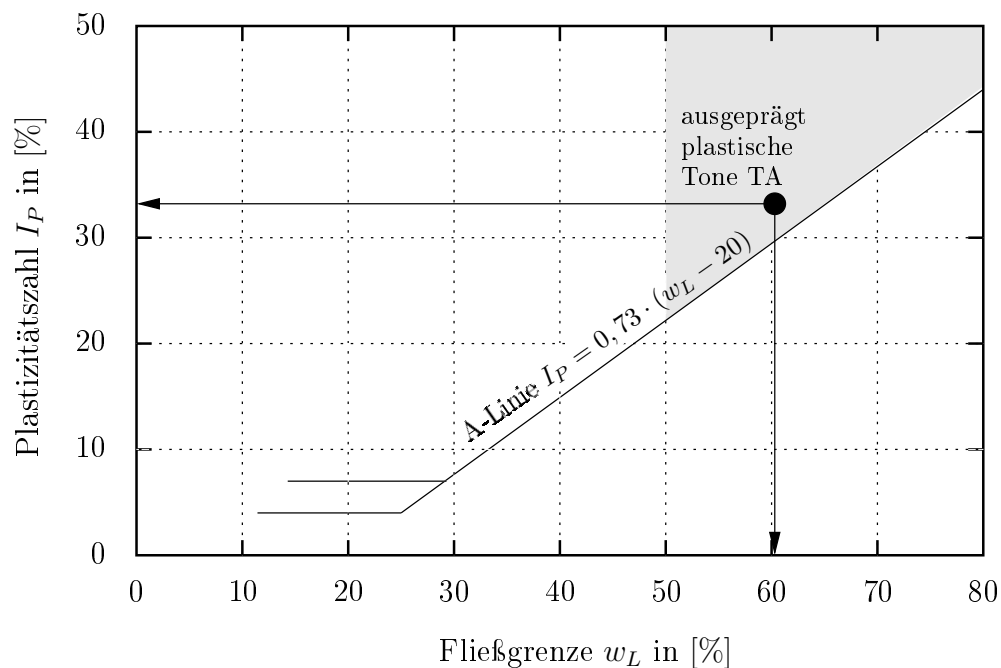
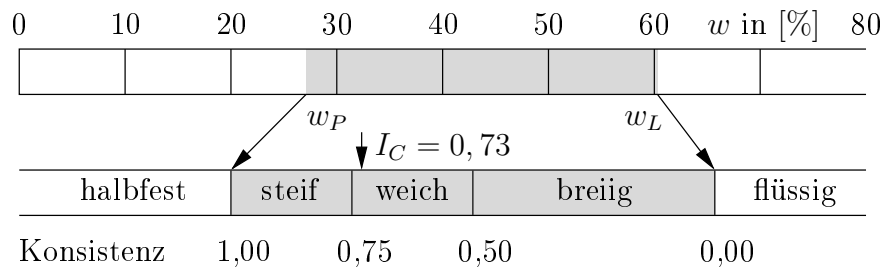


Bild 6.19: Plastizitätsdiagramm nach *DIN 18196*

Die vorhandene Konsistenz des ausgebauten und für die Versuchsdurchführung gelagerten Erdstoffs liegt im Übergangsbereich zwischen weicher und steifer Zustandsform. In Bild 6.20 ist die Konsistenzzahl I_C in den Bildsamkeitsbereich eingetragen.

Bild 6.20: Konsistenzbalken nach *Atterberg*

Die plastischen Eigenschaften des Erdstoffs werden durch die Art der Tonminerale bestimmt. Werden keine gesonderten mineralogischen Untersuchungen durchgeführt, kann anhand der Kornfraktion $d < 0,002\text{ mm}$ die Aktivitätszahl I_A nach *Skempton* [54] ermittelt werden. Hierbei handelt es sich um eine Kenngröße, die als Anzeiger für quellfähige Tonminerale dient. Je höher die Aktivität ist, desto größer ist auch das Wasseraufnahmevermögen der Tonminerale und somit die Volumenänderung und Fließgrenze. Die Aktivitätszahl wird nach *DIN 18122* [14] aus dem Verhältnis der Plastizitätszahl I_P zum Masseanteil der Körnungen $\leq 0,002\text{ mm}$ am Siebdurchgang $\leq 0,4\text{ mm}$ des Erdstoffs gebildet. In Tabelle 6.2 sind die Aktivitätsgrenzen nach *Skempton* und mittlere Aktivitätszahlen von Tonmineralien [59] dargestellt. Nach *Völtz et al.* [48] werden Aktivitätszahlen $I_A > 2$ als *sehr aktiv* eingestuft.

Tabelle 6.2: Aktivitätsgrenzen und typische Aktivitätszahlen bei mono-mineralischen Proben

Aktivitätszahlen I_A in [–]	Bezeichnung	Minerale und Aktivitätszahlen I_A in [–]
$< 0,75$	inaktiv	Quarzmehl (0), Kaolinit (0,4)
$0,75 - 1,25$	normal	Illit (0,9)
$> 1,25$	aktiv	Ca-Montmorillonit (1,5)
$> 2,0$	sehr aktiv	Na-Montmorillonit (7,5)

Die Korndichte ρ_s des Erdstoffs wurde mit einem Pyknometer „AccuPyc 1330“ bestimmt. In Tabelle 6.3 sind die ermittelten Kenngrößen zur Klassifizierung des Erdstoffs angegeben.

Tabelle 6.3: Zusammenstellung wichtiger Kennzahlen zur Klassifizierung des Erdstoffs

Bildsamkeitsbereich			Konsistenz I_C in [–]	Bodengruppe nach <i>DIN 18196</i>
w_P in [%]	w_L in [%]	I_P in [%]		
27,1	60,3	33,2	0,73	TA
Masseanteil der Körner in [%]			Aktivitätszahl I_A in [–]	Korndichte ρ_s in $[g/cm^3]$
$d < 0,002\text{ mm}$	$d < 0,02\text{ mm}$	$d < 0,063\text{ mm}$		
23,05	98,52	100,00	1,44	2,6796

6.2.1.2 Wasseraufnahmevermögen

Das Wasseraufnahmevermögen w_A wurde nach *DIN 18132* [17] mit dem in Bild 6.21 dargestellten Wasseraufnahmegerät bestimmt. Aufgrund der in Bild 4.7 dargestellten mineralogischen Zusammensetzung des Erdstoffs mit nicht quellfähigen Bestandteilen, wie Quarz und Feldspat, wurde das Wasseraufnahmevermögen auf maximal einhundert Prozent geschätzt. Hieraus folgt eine Probenmasse von $m_d = 1\text{ g}$ nach [17]. Die Versuchsdauer betrug 24 Stunden, um den Einfluss des quellfähigen Montmorillonit zu erfassen.

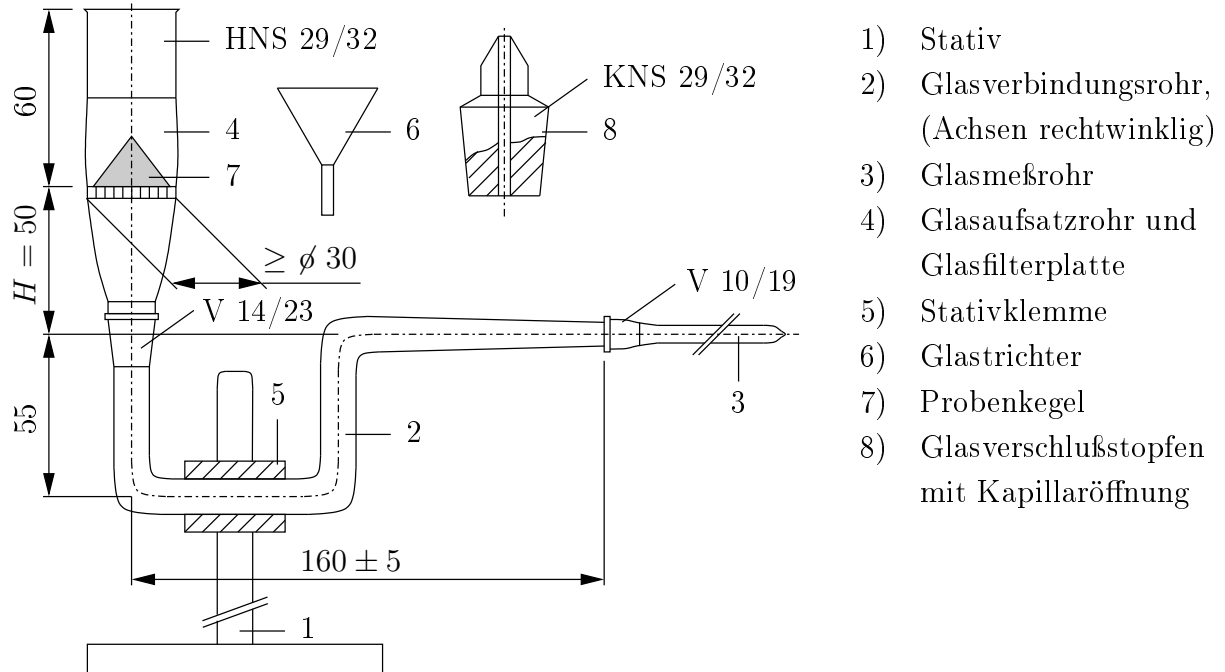


Bild 6.21: Wasseraufnahmegerät nach *Enslin/Neff* [47]

In Bild 6.22 sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Mit einem durchschnittlichen Wasseraufnahmevermögen von $\approx 95\%$ kann der Erdstoff nach Tabelle 2 der *DIN 18132* wiederum als ausgeprägt plastischer Ton (TA) mit Dichtungseigenschaften eingestuft werden.

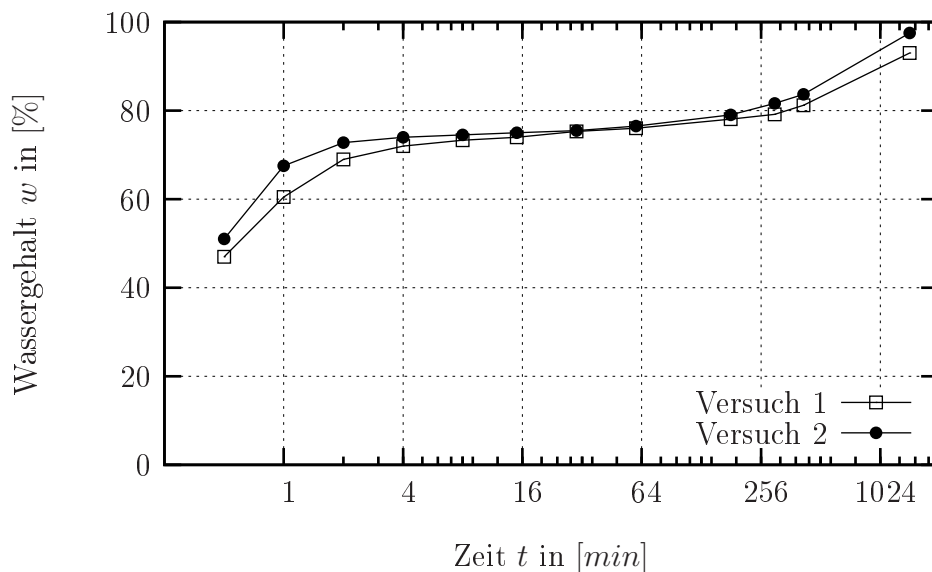


Bild 6.22: Zeit-Wassergehalts-Diagramm des Erdstoffs

6.2.1.3 Mineralogie des Erdstoffs

Gemischt- und feinkörnige Erdstoffe bestehen aus einer Vielzahl von Mineralien, die sich bei geologischen Prozessen aus übersättigten Schmelzen oder aus wässrigen Lösungen bilden. Da die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Erdstoffen durch ihre Komponenten bestimmt werden, wurden mineralogische Analysen durchgeführt. Diese Untersuchungen sollen einerseits die Zusammensetzung des Erdstoffs erfassen und andererseits als Referenzwert für die Veränderungen bei Zugabe von Bindemittelkombinationen dienen. Die mineralogischen Bestandteile wurden durch die Materialprüfanstalt Braunschweig und durch die Universität Rostock mit energiedispersiver Röntgenfluoreszenzspektroskopie (EDXRF) erfasst. Hierbei wird die Probe mit Röntgenstrahlung angeregt und die entstehende elementspezifische Fluoreszenzstrahlung energiedispersiv detektiert. Mit der EDXRF ist eine Identifizierung und Konzentrationsbestimmung aller Elemente ab der Ordnungszahl $Z = 9$ (Fluor) in chemischen Verbindungen möglich. In Tabelle 6.4 sind die Grundverbindungen des Erdstoffs, aus denen sich die vorhandenen Minerale zusammensetzen, quantitativ dargestellt.

Tabelle 6.4: Mineralogische Bestandteile des Erdstoffs

Bezeichnung	Formel	Konzentration in [%]
Siliciumdioxid	SiO_2	47,650
Calciumoxid	CaO	15,494
Eisen(III)-Oxid	Fe_2O_3	10,834
Aluminiumoxid	Al_2O_3	9,952
Kalium	K	9,948
Sonstige	$\text{MgO}/\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}/\text{SO}_3/\dots$	6,122

Aus diesen quantitativen Angaben kann jedoch nicht auf die vorhandenen Minerale in Rein- bzw. Mischform geschlossen werden, da Siliciumoxide Grundbaustein des Quarz, Feldspat, Glimmer und der Tonminerale sind.

Eine Zuordnung der vorhandenen Minerale ist durch die Auswertung des Beugungsdiagramms der Röntgenfeinstrukturanalyse möglich. Hierbei werden die erfassten Reflexe mit verbindungsspezifischen Datenbankeinträgen verglichen. Bild 4.7 zeigt bereits die mineralogische Zusammensetzung des Erdstoffs. Aus der Höhe der Reflexe kann auf die Konzentration bestimmter Minerale geschlossen werden. Eine genaue Auswertung ist jedoch nicht möglich, da Reflexüberlagerungen bei Tonmineralen auftreten. Das aufgenommene Beugungsdiagramm dient jedoch als Referenzwert für chemische Veränderungen bei den aufgetretenen Stabilisierungsreaktionen.

6.2.1.4 Proctorversuch bei Standardverdichtung

Die Proctorkurve des unbehandelten Erdstoffs wurde aus Versuchen im Standardproctor-topf ($h/d = 120/100 \text{ mm}$) mit einem programmierbaren Proctorgerät ermittelt. Die in Tabelle 6.1 dargestellten Schlagzahlanpassungen der Vorversuche wurden hierbei wiederum berücksichtigt. Mit diesen gewählten Parametern berechnet sich die Verdichtungsarbeit für 3 Einbaulagen zu:

$$\begin{aligned}
F &= m \cdot g &= 2,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 10^{-6} &= 2,4525 \cdot 10^{-5} \text{ MN} \\
s &= \sum n \cdot h_f &= (22 + 25 + 28) \cdot 0,3 \text{ m} &= 22,5 \text{ m} \\
V_{\text{zyl}} &= \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h &= \frac{\pi \cdot (0,10 \text{ m})^2}{4} \cdot 0,12 \text{ m} &= 9,424 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \\
W &= \frac{F \cdot s}{V_{\text{zyl}}} &= \frac{2,4525 \cdot 10^{-5} \text{ MN} \cdot 22,5 \text{ m}}{9,424 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3} &= 0,5855 \text{ MNm/m}^3 \\
&&&&&&\approx 0,6 \text{ MNm/m}^3
\end{aligned} \tag{6.1}$$

Die Proctorherstellung wurde entsprechend den Angaben der *DIN 18127* ausgeführt. Die Einbauhöhen der 3 Proctorschichten wiesen im verdichteten Zustand 4 cm, 4 cm und 5 cm auf. Der Überstand der obersten Schicht betrug für alle Versuche 1 cm ± 1 mm und wurde anschließend entfernt. Zusätzlich wurde die Methode der Verzahnung zwischen den Schichtgrenzen der Vorversuche übernommen. In Bild 6.23 ist die Proctorkurve des Erdstoffs für die Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ dargestellt. Der optimale Wassergehalt w_{proc} ergibt sich hiernach zu ca. 26 %.

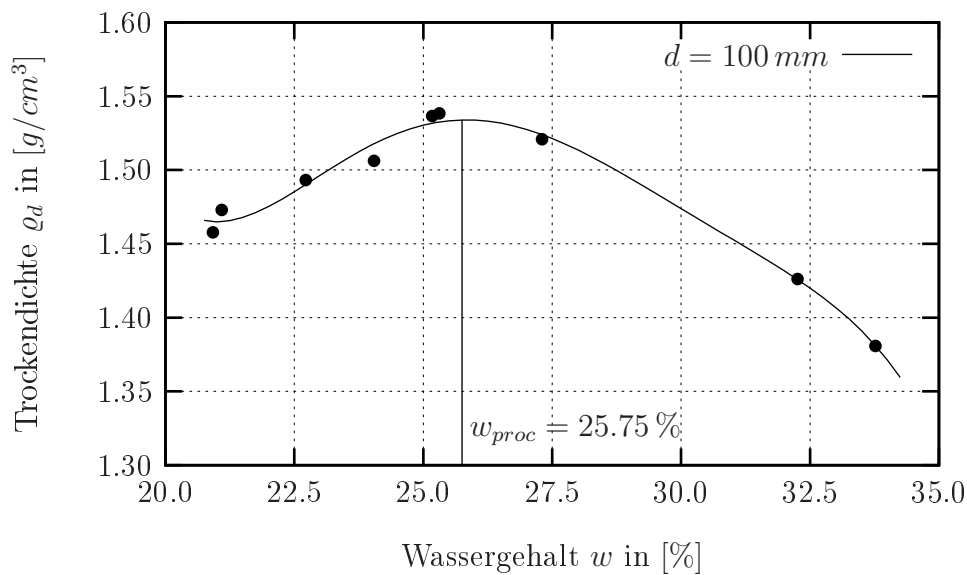


Bild 6.23: Proctorkurve des unbehandelten Erdstoffs bei einer ausgeführten Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$

Aufgrund des im Abschnitt 6.1.5 vorgeschlagenen Druckverdichtungsverfahrens und der hieraus resultierenden Probenabmessungen von $h/d = 120/60 \text{ mm}$ wurden die aus dem Erdstoff hergestellten Proctorkörper durch Abdrehen auf einen Durchmesser von $d = 60 \text{ mm}$ reduziert. Diese Proben wurden daraufhin gewogen und die Feuchtdichte ρ_f ermittelt. Nach anschließender einaxialer Prüfung wurde aus dem Inneren der Versuchskörper Probenmaterial entnommen und der Wassergehalt w bestimmt. In Tabelle 6.5 sind diese Größen für die Proctorkörper und die durchmesserreduzierten Kernkörper gegenübergestellt.

Tabelle 6.5: Vergleich der Wassergehalte w und Trockendichten ϱ_d zwischen Proctorkörper und Kernkörper bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$

Probe-Nr.	$\varnothing 100 \text{ mm}$		$\varnothing 60 \text{ mm}$	
	Wassergehalt w in $[-]$	Trockendichte ϱ_d in $[\text{g/cm}^3]$	Wassergehalt w in $[-]$	Trockendichte ϱ_d in $[\text{g/cm}^3]$
P 01	0,2094	1,4578	0,2084	1,5057
P 02	0,2106	1,4729	0,2084	1,5199
P 03	0,2255	1,4931	0,2237	1,5522
P 04	0,2404	1,5061	0,2400	1,5447
P 05	0,2517	1,5366	0,2472	1,5718
P 06	0,2531	1,5383	0,2525	1,5750
P 07	0,2731	1,5209	0,2670	1,5530
P 08	0,3225	1,4262	0,3127	1,4491

Die grafische Auswertung dieser Daten ist Bild 6.24 zu entnehmen. Aufgrund des Abtragens der herstellungsbedingten, nicht optimal verdichteten Mantelzonen verschiebt sich die Proctorkurve für die abgedrehten Probekörper in Richtung größerer Dichten und geringfügig in Richtung verminderter Wassergehalte. Diese Verschiebung bestätigt den höher verdichteten Kernbereich sowie die größere Wassereinlagerung in den Mantelzonen. Die Wassergehaltsdifferenz zwischen Mantel- und Kernkörper nimmt mit steigendem Wassergehalt des Erdstoffs zu.

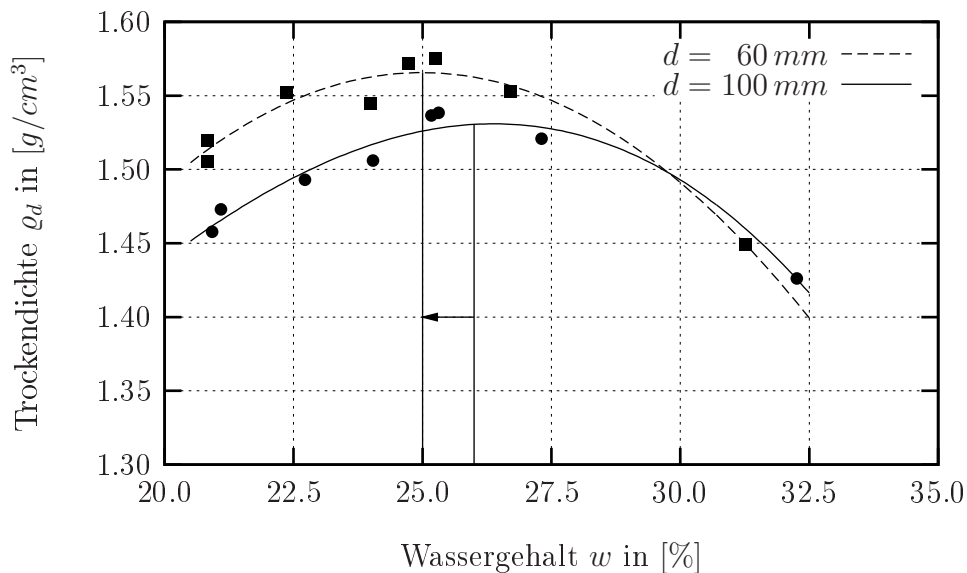


Bild 6.24: Vergleich der Proctorkurven mit und ohne Reduzierung des Probendurchmessers bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$

Die einaxialen Druckversuche der Kernkörper ergeben eine starke Abhängigkeit der Druckfestigkeiten von den Wassergehalten. Das Bild 6.25 verdeutlicht die Abnahme der Druckfestigkeit mit steigendem Wassergehalt. Bei Wassergehalten von mehr als 26% kann eine überdurchschnittlich hohe Verformungszunahme und ein starker Abfall der Festigkeit beobachtet werden. Die Verformungsgeschwindigkeit v der einaxialen Druckversuche ent-

sprach aus Gründen der Vergleichbarkeit denen der Vorversuche mit 0,2% der Probenanfangshöhe h in $[mm/min]$, obwohl die zu erwartende Bruchstauchung ε_u deutlich höher zu erwarten war als die in *DIN 18136* angegebene maximale Bruchstauchung von 4% für stabilisierte und verkittete Erdstoffe.

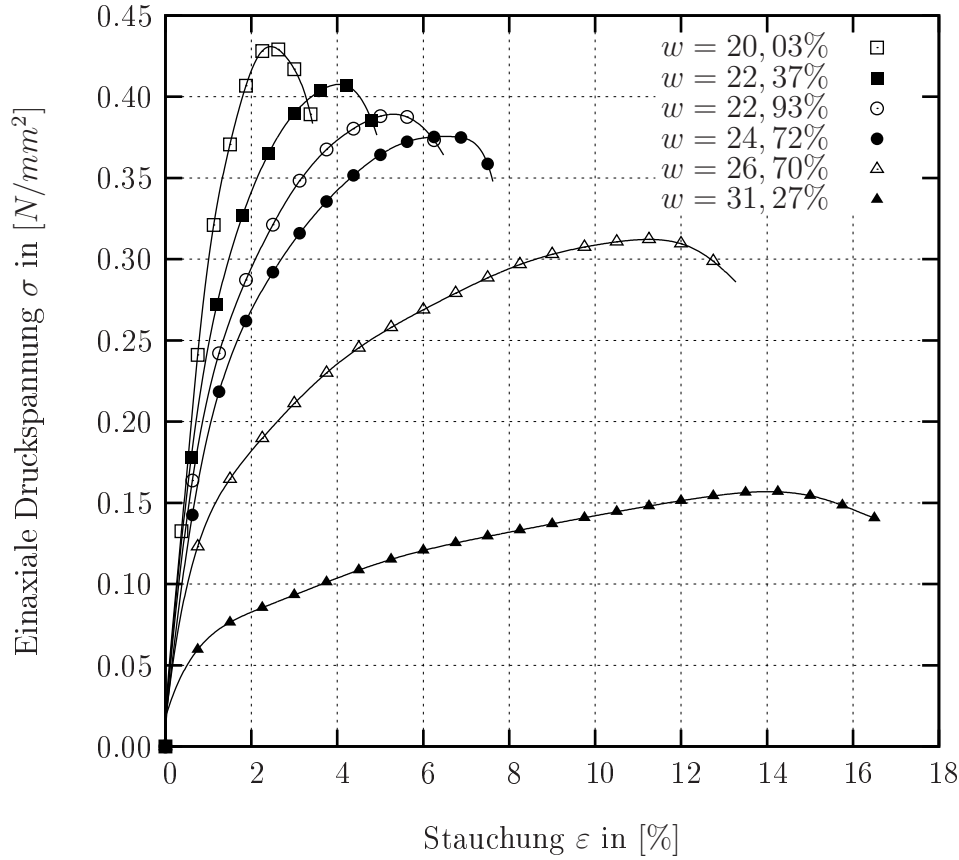


Bild 6.25: Spannungs-Dehnungs-Linien des unbehandelten Erdstoffs in Abhängigkeit vom Wassergehalt w bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm}/\text{m}^3$

6.2.1.5 Proctorversuch bei doppelter Standardverdichtung

Die Herstellung dieser Proctorkörper wurde analog den Vorversuchen ausgeführt, d.h. die Anzahl der Einbaulagen wurde im Vergleich zur Standardproctorarbeit verdoppelt. In Tabelle 6.1 sind die ausgeführten Schlagzahlen je Schicht und die Anzahl der Schichten dargestellt. Somit besteht die Änderung zu Gleichung 6.1 lediglich im Faktor 2 bei der Berechnung des Arbeitsweges s . Die doppelte Verdichtungsarbeit berechnet sich somit zu:

$$\begin{aligned}
 s &= \sum n \cdot h_f = 2 \cdot (22 + 25 + 28) \cdot 0,3 \text{ m} = 45 \text{ m} \\
 W &= \frac{F \cdot s}{V_{\text{zyl}}} = \frac{2,4525 \cdot 10^{-5} \text{ MN} \cdot 45 \text{ m}}{9,424 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3} = 1,171 \text{ MNm}/\text{m}^3 \quad (6.2) \\
 &\approx 1,2 \text{ MNm}/\text{m}^3
 \end{aligned}$$

Die Massen der 6 Einbauschichten wurden wiederum so gewählt, dass im verdichteten Zustand die unteren 5 Einbaulagen jeweils eine Höhe von 2 cm und die obere Schicht eine Höhe von 3 cm aufwiesen. Der Wassergehalt des Erdstoffs wurde durch Ofentrocknung nach *DIN 18121* [13] bestimmt. In Bild 6.26 ist die Proctorkurve für die Verdichtungsarbeit von $W = 1,2\text{ MNm/m}^3$ dargestellt. Der optimale Wassergehalt w_{proc} ergibt sich hiernach zu etwa $20,5\%$.

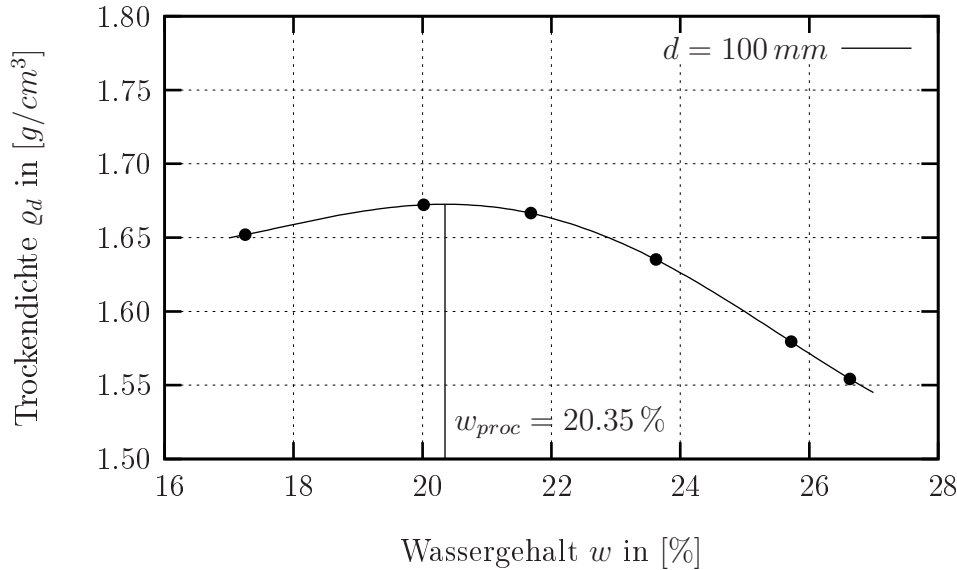


Bild 6.26: Proctorkurve des unbehandelten Erdstoffs bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2\text{ MNm/m}^3$

Die anschließende Reduzierung der Probendurchmesser auf $d = 6\text{ cm}$ basiert wiederum auf den Probekörperabmessungen des Druckverdichtungsverfahrens. Die Verschiebung der Proctorkurve der Kernkörper in Richtung höherer erzielbarer Dichten bei vermindertem optimalen Wassergehalt ist analog zur Standardverdichtung zu beobachten.

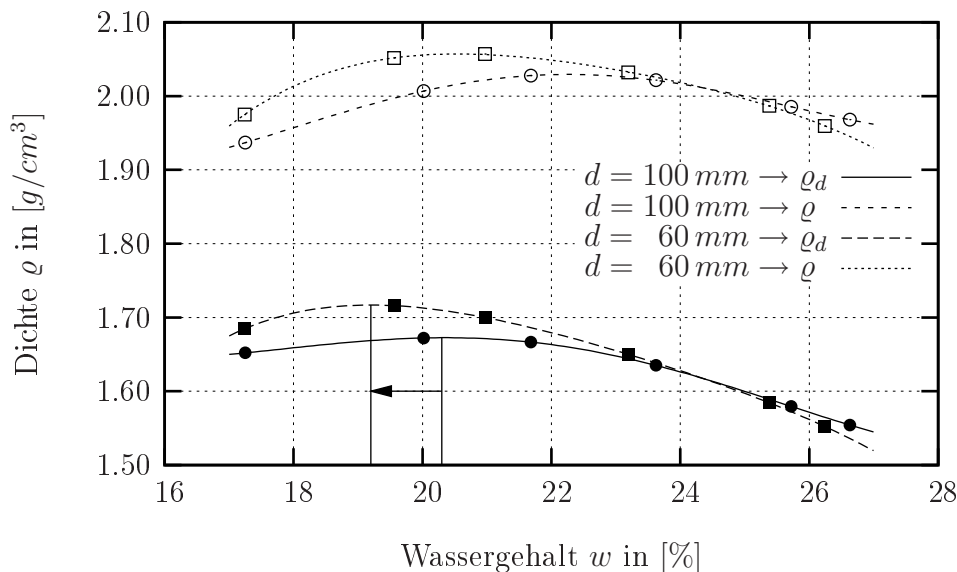


Bild 6.27: Vergleich der Proctorkurven mit und ohne Reduzierung des Probendurchmessers bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2\text{ MNm/m}^3$ (Dichte ρ und Trockendichte ρ_d)

In Bild 6.27 sind die erzielbaren Trockendichten ρ_d und Einbaudichten ρ bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MN/m}^3$ dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass bei den homogener verdichteten Kernkörpern die optimalen Wassergehalte zur Erzielung der maximalen Trockendichte und Feuchtdichte nur geringfügig differieren.

Der Vergleich der einaxialen Druckfestigkeiten zwischen einfacher und doppelter Proctorarbeit kann näherungsweise über einen Vergleichswassergehalt w_{vgl} erfolgen. Hierbei stellt die Differenz Δw der optimalen Wassergehalte w_{proc} der gewählten Verdichtungsarbeiten die Korrekturgröße dar, sodass gilt:

$$w_{vgl} = w_1 + \underbrace{(w_{proc2} - w_{proc1})}_{\Delta w} \approx w_2 \quad (6.3)$$

Für den gewählten Erdstoff ergibt sich eine Abweichung der optimalen Wassergehalte von $\Delta w = 5,4\%$. Zur Demonstration wird der Vergleichswassergehalt w_{vgl} der Zeile 1 aus Tabelle 6.6 in Gleichung 6.4 berechnet.

$$w_{vgl} = 22,93\% + (20,35\% - 25,75\%) = 17,53\% \quad (6.4)$$

Die aufgewandte Verdichtungsarbeit W korreliert mit dieser Betrachtungsweise direkt mit den erzielbaren Druckfestigkeiten q_u , sodass eine Umrechnung in Abhängigkeit der Verdichtungsarbeit W näherungsweise nach Gleichung 6.5 erfolgen kann.

$$q_{u1} \approx q_{u2} \cdot \frac{W_1}{W_2} \quad (6.5)$$

In Tabelle 6.6 sind die vergleichbaren Festigkeiten hervorgehoben. Die Abweichungen liegen hierbei bei weniger als $0,02 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 6.6: Festigkeitsvergleich der einaxialen Druckspannungen für einfache und doppelte Proctorarbeit

Proctorarbeit $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$		Vergleichs- feuchte w_{vgl} in [%]	Proctorarbeit $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$		Vergleichs- spannung $\frac{q_u}{2}$ in [N/mm^2]
w in [%]	q_u in [N/mm^2]		w in [%]	q_u in [N/mm^2]	
22,93	0,3892	17,53	17,24	0,7384	0,3692
24,72	0,3756	19,32	19,56	0,7167	0,3584
26,70	0,3122	21,30	20,97	0,6269	0,3135
31,27	0,1569	25,87	25,38	0,2773	0,1387
Meßwerte		theor. Wert	Meßwerte		theor. Wert

Eine Vergleichbarkeit der Bruchstauchungen ε_u kann mit dieser Betrachtungsweise jedoch nicht erfolgen.

In Bild 6.28 sind die maximalen einaxialen Druckfestigkeiten q_u und Bruchstauchungen ε_u des Erdstoffs in Abhängigkeit des Wassergehaltes w bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ dargestellt.

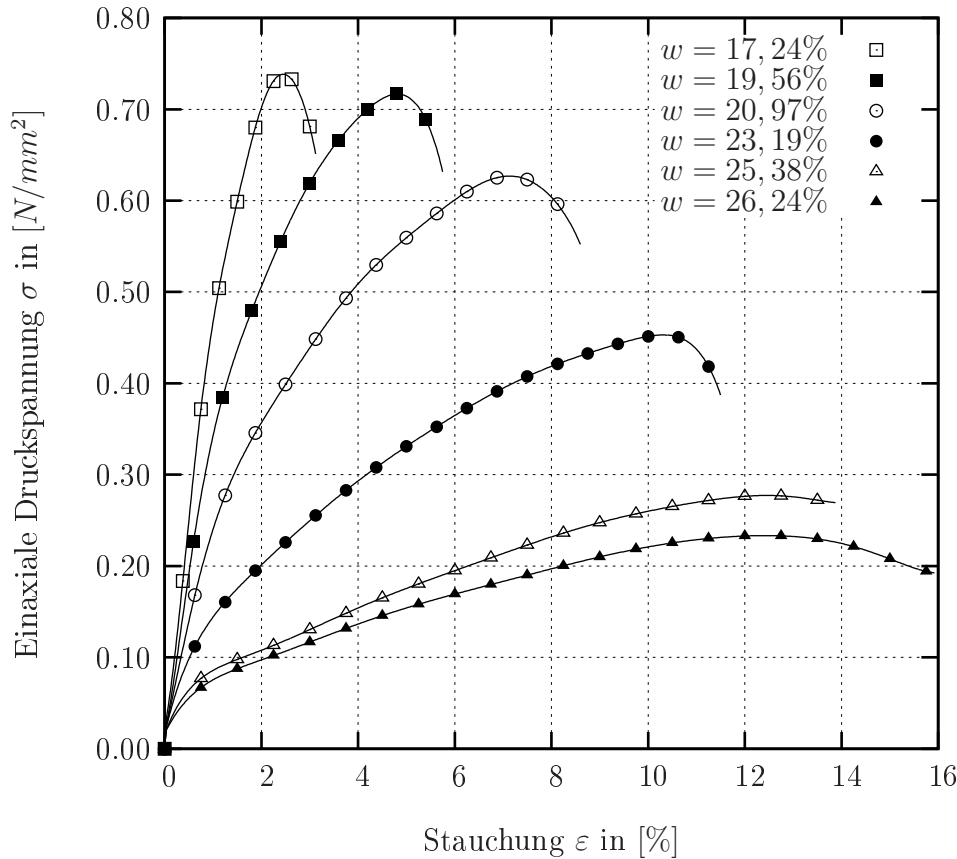


Bild 6.28: Spannungs-Dehnungs-Linien des unbehandelten Erdstoffs in Abhängigkeit vom Wassergehalt w bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$

Wiederum ist zu erkennen, dass die höchsten Festigkeiten nicht mit dem optimalen Verdichtungswassergehalt w_{proc} zusammenfallen, sondern auf dem trockenem Ast der Proctorkurve liegen. Mit Konsistenzzahlen $I_C > 1$ befindet sich der Erdstoff außerhalb des Bildsambereichs im halbfesten bzw. festen ($w < 18,8\%$) Zustand. Eine weitere Abnahme des Wassergehaltes w vergrößert die Festigkeit der einzelnen Tonkrümel, jedoch vermindert sich die Gesamtdruckfestigkeit des Probekörpers, da sich kein Haftverbund zwischen den Erdstoffkrümeln ausbilden kann. Wassergehalte unterhalb der Schrumpfgrenze w_s , d.h. Wassergehalte, die kein Quellen der Tonminerale mehr verursachen, sind versuchstechnisch nur unzureichend auszuführen. Die Folge sind Abrisse von Proctorschichten während des Ausdrückens aus dem Proctortopf bzw. das vollständige Zerfallen des Probekörpers.

Zur Vergleichbarkeit des dynamischen Proctorverdichtungsverfahrens mit dem vorgeschlagenen, überwiegend statischen Druckverdichtungsverfahren wurden die einaxialen Druckfestigkeiten zusätzlich an druckverdichteten Körpern ermittelt. Hierzu sind die aus der Proctorkurve ermittelten Feuchtdichten in Einbaumassen umgerechnet worden. Die Herstellung dieser Probekörper entsprach der in Abschnitt 6.1.5 beschriebenen Vorgehensweise. In Bild 6.29 sind die Druckfestigkeiten für die druckverdichteten Körper dargestellt. Die Bruchspannungen liegen ca. 10% unter denen der Proctorversuche.

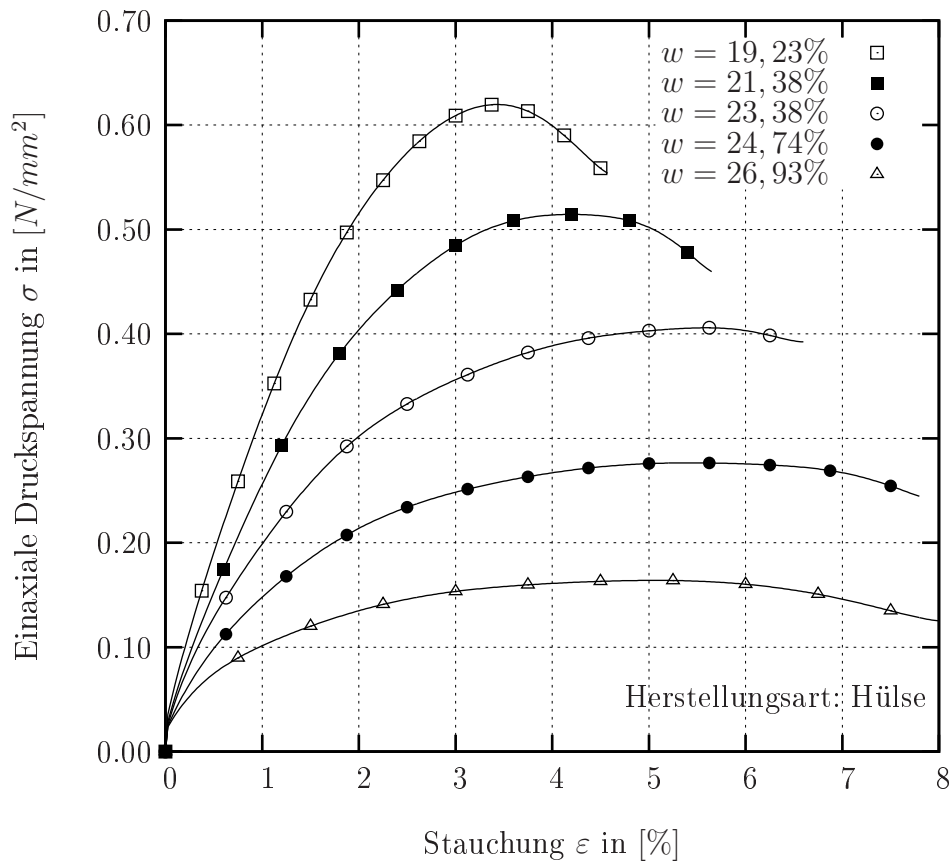


Bild 6.29: Spannungs-Dehnungs-Linien des unbehandelten Erdstoffs in Abhängigkeit vom Wassergehalt w mit äquivalenten Einbaudichten ϱ zur Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$

Somit liefert die vorgeschlagene Herstellungsmethode zu geringe Festigkeiten, was jedoch in Hinblick auf die Bemessungssicherheit einen Vorteil darstellt. Auffällig sind die um bis zu 40% geringeren Verformungen im Bruchzustand.

6.2.2 Erdstoff-Kalk-Gemisch

Zur Untersuchung des Verhaltens von Erdstoff-Kalk-Gemischen und zur Überprüfung der Verfestigungseignung des verwendeten Erdstoffs wurden umfangreiche Versuche durchgeführt. Diese dienen der Ermittlung der maximal erzielbaren Dichte $\max \varrho$, der Bestimmung des optimalen Wassergehaltes w , der Erfassung der reaktionsbedingten Temperaturerhöhung ΔT und Wassergehaltsänderung Δw sowie der Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeiten q_u nach 28 Tagen. Für die Untersuchungen wurde als Bindemittel ein Baukalk CL80 in Pulverform nach *EN 459-1* [10] verwendet.

Das Verfestigungsverhalten ist an Proctorkörpern mit einem CL80-Anteil von $6 \text{ M} - \%$, bezogen auf die Erdstofftrockenmasse, untersucht worden. Die Verdichtungsarbeiten W entsprachen denen der Vorversuche mit $0,6 \text{ MNm/m}^3$ und $1,2 \text{ MNm/m}^3$. Die durch den Mischvorgang initiierte Sofortreaktion zwischen dem Calciumhydroxid CL80, den Tonmineralen des Erdstoffs und dem Bodenwasser, d.h. der einsetzende Ionenaustausch und die Wasserbindung führten zur Koagulation des Gemisches und einer prozessbedingten Wärmeentwicklung. In Bild 6.30 ist die Reduktion des Wassergehaltes dieses Erdstoff-Kalk-

Gemisches nach einstündiger Reaktionszeit dargestellt. Der Wassergehalt wurde durch Ofentrocknung bei 105°C bestimmt, wobei mögliche chemische Reaktionen, die während der Trocknungsdauer einsetzen, nicht erfasst werden können.

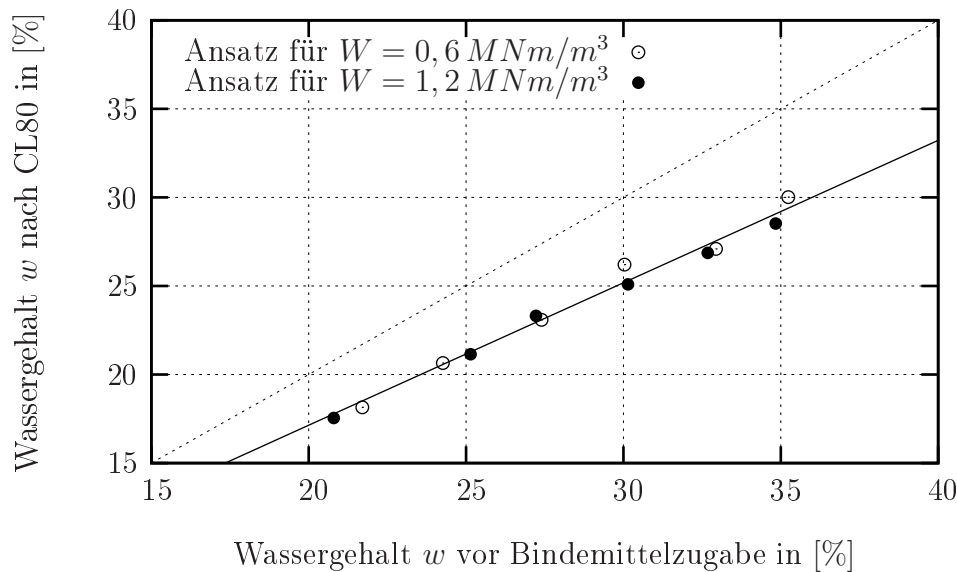


Bild 6.30: Wassergehaltsänderung infolge 6%-iger CL80-Zugabe zum Erdstoff

Es ist ersichtlich, dass die Wassergehaltsreduktion bei gleicher Kalkmenge von der Feuchte des Ausgangserdstoffes abhängig ist. Je nasser der Erdstoff ist, desto geringer ist die Saugspannung und somit die Bindungsfestigkeit des Wassers im Erdstoff. Dieses schwach gebundene Wasser steht somit der chemischen Reaktion mit dem Kalkhydrat leichter zur Verfügung. Die die Reaktion begleitende Temperaturerhöhung ist in Bild 6.31 dargestellt.

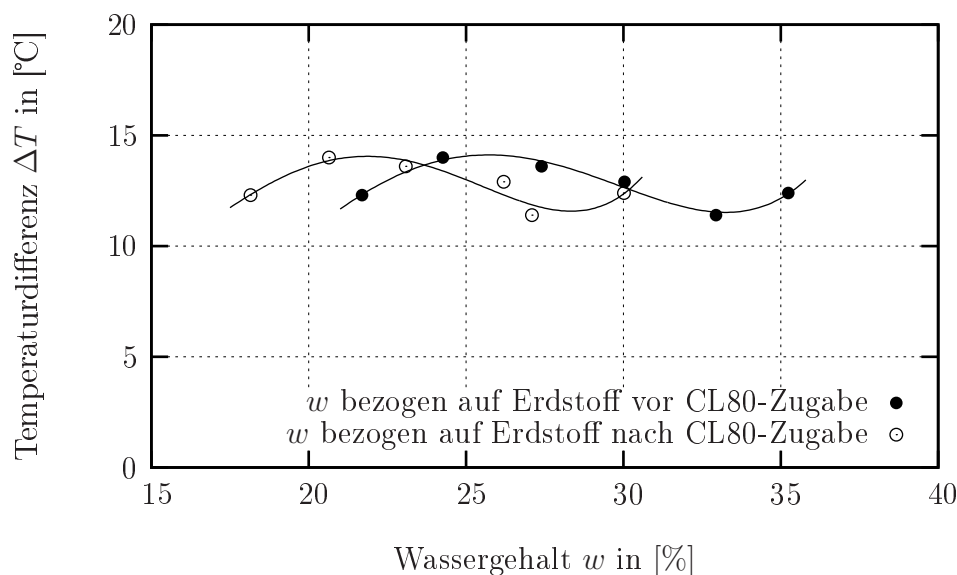


Bild 6.31: Temperaturänderung ΔT bei 6%-iger CL80-Zugabe zum Erdstoff nach einstündiger Reaktion

Die Verschiebung der Kurven in Bild 6.31 beruht auf dem Referenzzeitpunkt der Wassergehaltsermittlung vor und nach der Bindemittelzugabe nach Bild 6.30.

6.2.2.1 Proctorversuch bei Standardverdichtung

Die Herstellung der Proctorkörper wurde auf die gleiche Weise und mit den gleichen Parametern ausgeführt wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben. Der Wassergehalt wurde jeweils am Ausgangserdstoff sowie am Erdstoff-Kalk-Gemisch direkt vor der Proctorherstellung bestimmt. Als Rechengrundlage für die Bestimmung der Trockendichte $\varrho_d = \varrho/(1 + w)$ dient jedoch ausschließlich der Wassergehalt w des Erdstoff-Kalk-Gemisches. In den Bildern 6.32 und 6.33 sind die Dichten ϱ und die Trockendichten ϱ_d der Proctorversuche für eine Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ dargestellt.

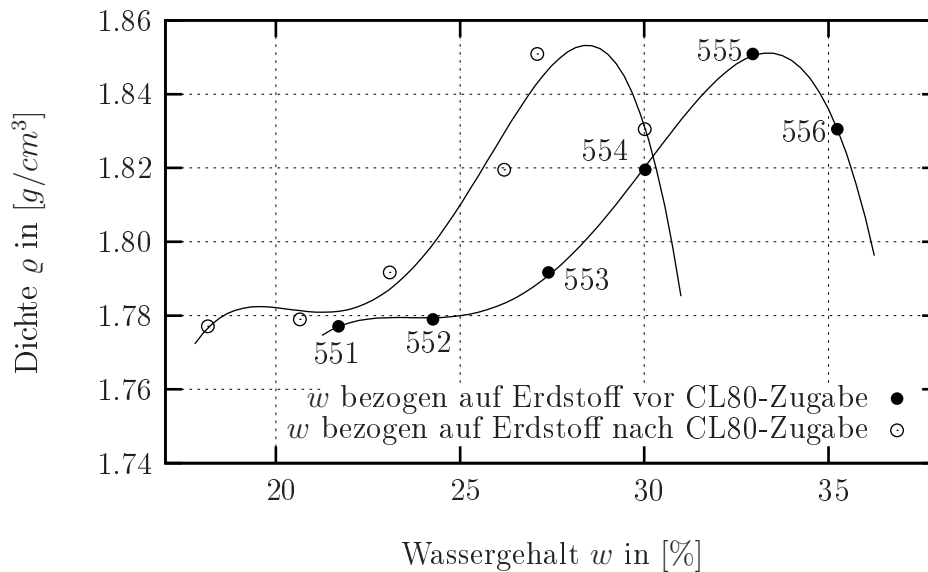


Bild 6.32: Dichte ϱ des Erdstoff-Kalk-Gemisches mit einem 6%-igem CL80-Anteil und einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Probekörper K551 – 556)

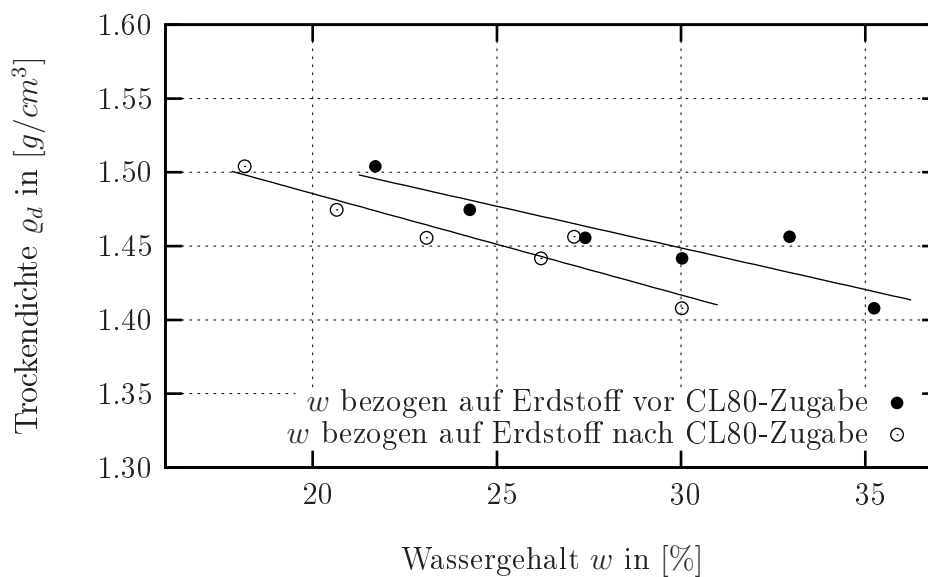


Bild 6.33: Trockendichte ϱ_d des Erdstoff-Kalk-Gemisches mit einem 6%-igem CL80-Anteil und einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$

Eine Analogie zwischen der Dichte ϱ und der Trockendichte ϱ_d entsprechend Bild 6.27 kann

für den mit Kalk behandelten Erdstoff nicht festgestellt werden. Während die Dichte ρ und die Verdichtungsfähigkeit im trockenen Bereich abnehmen, steigt hier die Trockendichte ρ_d stetig an. Die in der Bodenmechanik übliche Kenngröße der maximalen Trockendichte $\max \rho_d$ zur Bestimmung des optimalen Wassergehaltes w_{proc} konnte im Proctorversuch nicht erreicht werden. Aufgrund des zu geringen Wassergehaltes wiesen diese Probekörper keinen inneren Verbund mehr auf, sodass der Trockendichte in Bezug auf die Probenqualität keine Aussagefähigkeit zugewiesen werden konnte.

Die Proctorkörper wurden anschließend entsprechend Abschnitt 6.1.2 in einem Klimaschrank 28 Tage, ohne Frost-Tau-Wechsel, gelagert. Hiernach wurden die Proben auf die Abmessungen $h/d = 120/60\text{ mm}$ abgefräst. In Bild 6.34 sind diese schlanken Proben dargestellt.

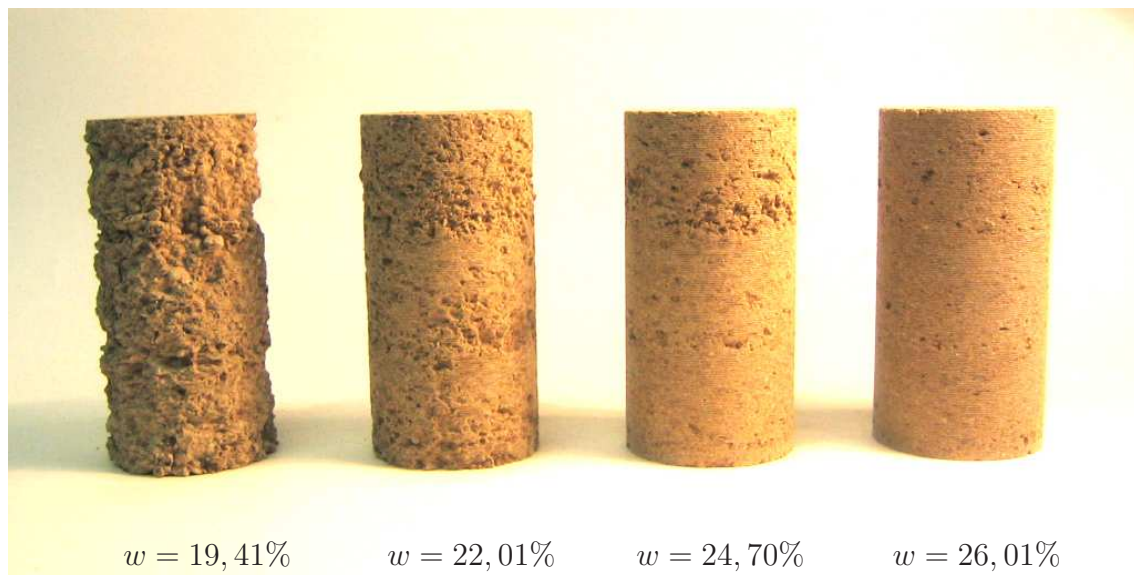


Bild 6.34: Probekörper K552 – 555 (von links nach rechts) nach Anpassung des Schlankheitsgrades nach 28 Tagen
(CL80-Anteil: 6% – Verdichtungsarbeit: $W = 0,6\text{ MNm/m}^3$)

Ein homogenes Gefüge bildet sich nur für den Wassergehalt im Bereich der größten erzielbaren Dichte ρ aus. Je trockener die Probekörper sind, desto deutlicher zeichnet sich eine krümelige, haufwerksporige Struktur ab. Der Verbund zwischen den angrenzenden Partikeln nimmt ab, sodass ein oberflächiges Herauslösen von den granulatähnlichen Gemischpartikeln erfolgen kann. Aufgrund der schlechter werdenden Verdichtungsfähigkeit im trockenen Bereich, bildet sich verstärkt die herstellungsbedingte, proctortypische Dichteverteilung aus. Die beiden linken Körper in Bild 6.34 zeigen deutlich die Schichtgrenzen der Einbaulagen sowie die verstärkte zonale Auflockerung des Gefüges.

Die oberflächigen Unebenheiten der Probekörper mit einem Wassergehalt $w < 25\%$ wurden mit einem Stuckgips nach DIN 1168 [12] ausgeglichen. Die anschließenden einaxialen Druckfestigkeitsprüfungen wurden nach DIN 18136 für stabilisierte Erdstoffe ausgeführt.

In Tabelle 6.7 sind die Wassergehalte sowie die Versagensgrößen der Probekörper dargestellt. Hiernach reduzieren sich die Wassergehalte während der 28-tägigen Lagerung im Klimaschrank um etwa 1,5%. Diese Wassergehaltsabnahme kann auf eine Wassereinbindung in thermisch stabile Verbindungen zurückzuführen sein.

Tabelle 6.7: Versagensgrößen der Probekörper *K552 – K556*(CL80-Anteil: 6% – Verdichtungsarbeit: $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$)

Probe-Nr.	Dichte ϱ in $[\text{g/cm}^3]$	Wassergehalt $w(1h/28d)$ in [%]	Druckfestigkeit q_u in $[\text{N/mm}^2]$	Bruchstauchung ε_u in [%]
K 552	1,7790 ↓	20,65 / 19,41	0,4881 ↓	1,2915
K 553	1,7917 ↓	23,09 / 22,01	1,1919 ↓	1,2070
K 554	1,8195 ↓	26,20 / 24,70	1,6375 ↓	1,1845
K 555	<u>1,8509</u>	27,10 / 26,01	<u>2,2105</u>	1,1917
K 556	1,8305 ↑	30,02 / 28,62	2,0195 ↑	1,0952

Das Bild 6.35 stellt die Spannungs-Dehnungs-Linien der in Bild 6.34 enthaltenen Probekörper dar. Hieraus wird ersichtlich, dass eine starke Abhängigkeit zwischen der maximalen Druckspannung, d.h. der einaxialen Druckfestigkeit q_u und dem Wassergehalt w vorliegt.

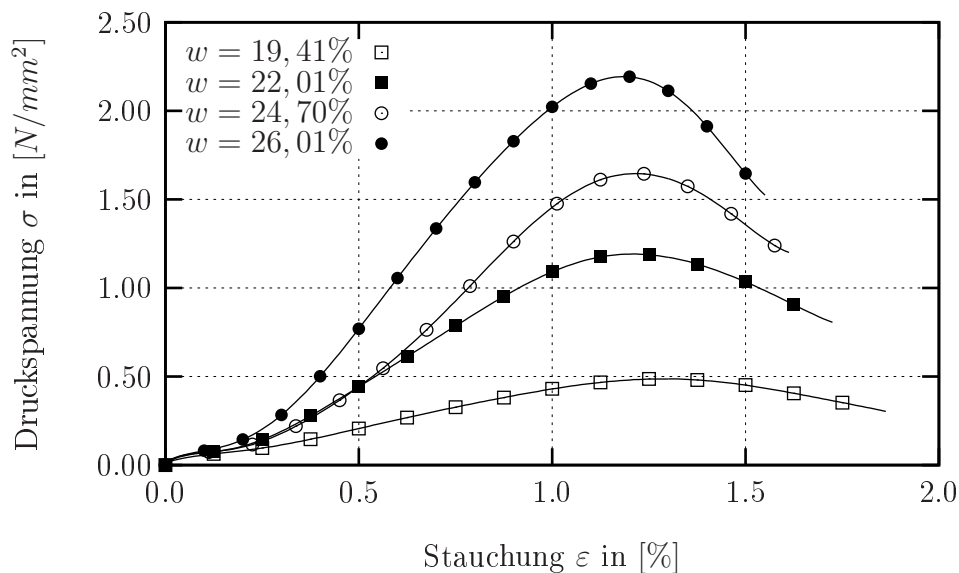


Bild 6.35: Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper *K552 – 555* nach 28 Tagen mit einem Seitenverhältnis von $h/d = 120/60 \text{ mm}$
(CL80-Anteil: 6% – Verdichtungsarbeit: $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$)

Nach Tabelle 6.7 besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der im Proctorversuch erzielten Dichte ϱ und der einaxialen Druckfestigkeit q_u . Hierbei wirken sich geringe Abweichungen vom optimalen Wassergehalt unmittelbar auf das Gefüge und die Festigkeit aus.

6.2.2.2 Proctorversuch bei doppelter Standardverdichtung

Die Herstellung der Proctorkörper erfolgt analog der Standardverdichtung nach Abschnitt 6.2.2.1, jedoch mit sechs Einbauschichten. Aufgrund der hieraus resultierenden Verdoppelung der Verdichtungsschläge des Proctorhammers ist ein Dichteanstieg bei gleichzeitiger Verminderung des optimalen Wassergehaltes zu verzeichnen. Die Differenz

der Wassergehalte Δw zur Erzielung der maximalen Einbaudichte $\max \rho$ zwischen den Verdichtungsarbeiten $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ und $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ beträgt etwa 5,5% und entspricht somit der Größenordnung des Erdstoffs ohne Kalkzugabe, wie bereits in Abschnitt 6.2.1.5 dargestellt wurde.

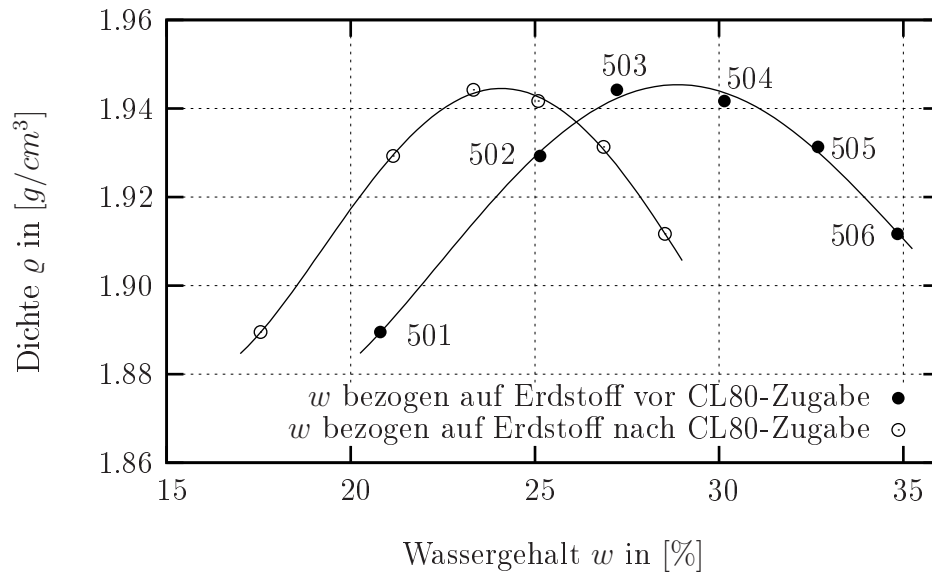


Bild 6.36: Dichte ρ des Erdstoff-Kalk-Gemisches mit einem 6%-igem CL80-Anteil und einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Probekörper $K501 - 506$)

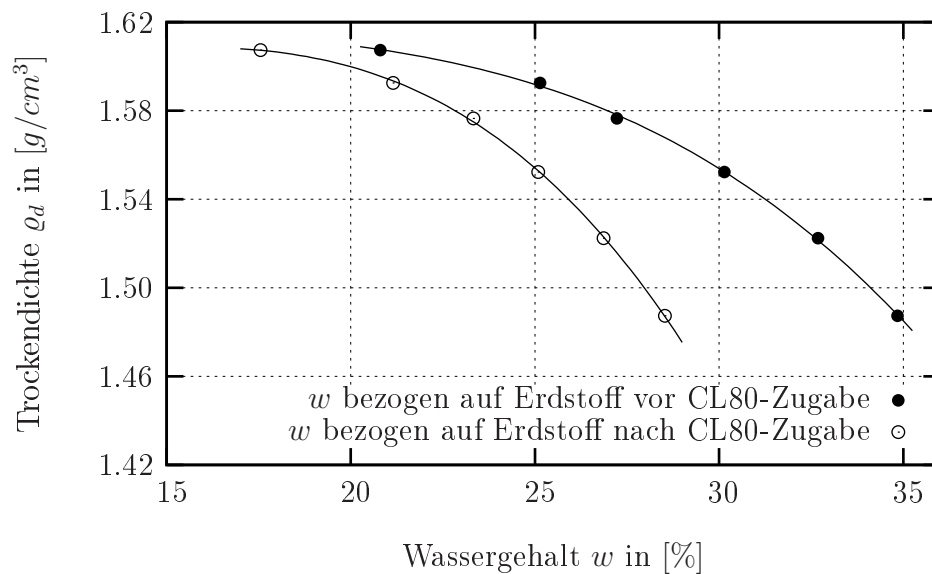


Bild 6.37: Trockendichte ρ_d des Erdstoff-Kalk-Gemisches mit einem 6%-igem CL80-Anteil und einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$

In den Bildern 6.36 und 6.37 sind die Dichten ρ und die Trockendichten ρ_d der Proctorversuche für eine Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ dargestellt. Hierin ist wiederum zu erkennen, dass die maximale Trockendichte $\max \rho_d$ im Proctorversuch nicht erreicht wurde. Aufgrund des geringen Wassergehaltes lag kein Haftverbund zwischen den Gemischpartikeln vor, sodass der Probekörper beim Auspressvorgang granulatähnlich zerfiel.

Die 28-tägige Lagerung der Probekörper und die Anpassung der Abmessungen auf $h/d = 120/60\text{ mm}$ wurde entsprechend Abschnitt 6.2.2.1 ausgeführt. Die einaxiale Druckfestigkeitsprüfung wurde wiederum mit einer Verformungsgeschwindigkeit von $v = 0,24\text{ mm/min}$ durchgeführt. Im Bild 6.38 sind die einaxialen Druckfestigkeiten q_u der Probekörper enthalten.

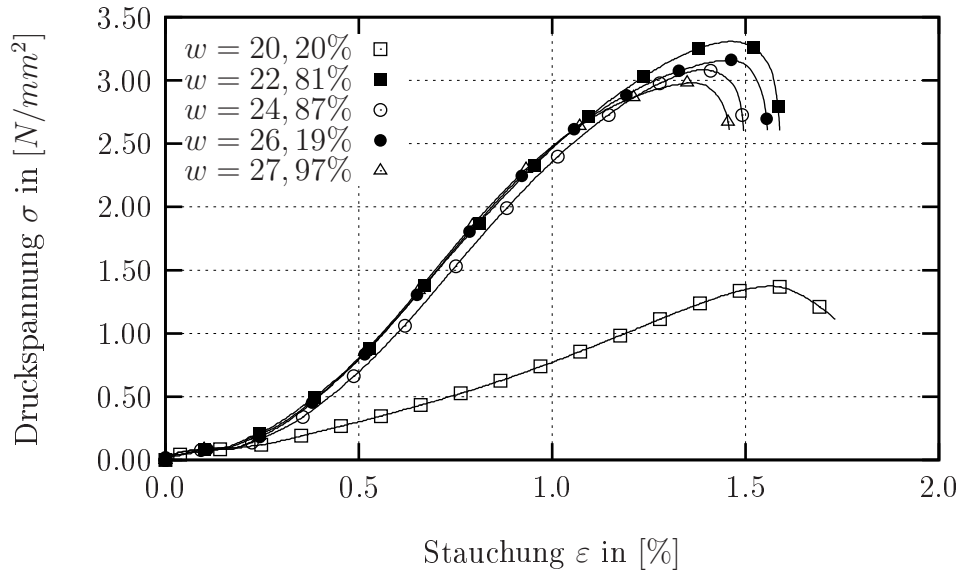


Bild 6.38: Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper *K502 – 506* nach 28 Tagen mit einem Seitenverhältnis von $h/d = 120/60\text{ mm}$
(CL80-Anteil: 6% – Verdichtungsarbeit: $W = 1,2\text{ MNm/m}^3$)

Die Verdoppelung der Verdichtungsarbeit auf $W = 1,2\text{ MNm/m}^3$ bewirkt für die Probekörper mit der maximalen Einbaudichte $\max \rho$ eine Steigerung der einaxialen Druckfestigkeit q_u um etwa 50%. Weiterhin ist zu erkennen, dass diese erhöhte Verdichtungsarbeit den Einfluss des Wassergehaltes auf die Druckfestigkeit nahezu kompensiert. Es bildet sich ein Wassergehaltsbereich zwischen 22% – 28% aus, in dem die einaxialen Druckfestigkeiten nahezu identisch sind. Erst bei Wassergehalten außerhalb dieses Bereiches ist ein starker Abfall der Druckfestigkeit festzustellen.

6.2.3 Gemischkombinationen

Zur Ermittlung eines geeigneten Bindemittelgemisches für die Stabilisierung des Erdstoffs wurden vier Gemischkombinationen, bestehend aus dem Bindemittel Kalk sowie einem Zusatzstoff, untersucht. Diese Gemischkombinationen sind dem Erdstoff in 3 unterschiedlichen Mengen zugegeben worden, wobei das Verhältnis zwischen Bindemittel und Zusatzstoff konstant blieb. Als Bindemittel fand ein Weißkalk CL80 mit den Masseanteilen 2%, 4% und 6% der Erdstofftrockenmasse inklusive Zusatzstoff Verwendung. Als Zusatzstoffe wurden Steinkohleflugasche (SFA), Hüttensandmehl (HSM) sowie teilweise Aluminumpulver und Aluminiumgranulat eingesetzt. Durch die Verwendung der latent hydraulischen, künstlichen Puzzolane Steinkohleflugasche und Hüttensandmehl sowie pulverisiertem Aluminium sollte die Bildung von Calciumsilicaten und -aluminaten begünstigt werden.

Die Zugabemengen des Aluminumpulvers und -granulates entsprechen 0,5%, 1% und 1,5% und die Zugabemengen der Steinkohleflugasche und des Hüttensandmehles entsprechen 4%, 8% und 12% der Erdstofftrockenmasse. Zusätzlich wurde als Referenzwert eine Versuchsserie nur mit Kalk ohne Zusatzstoff hergestellt. In Tabelle 6.8 sind die 15 untersuchten Gemischkombinationen dargestellt.

Tabelle 6.8: Untersuchte Erdstoff-Zusatzstoff-Bindemittelgemische

Gemisch-Nr. / Seriensymbol			Bindemittel und Zusatzstoffe in Masseprozent der Erdstoffgemischtrockenmasse					Verhältnis Bindemittel/ Zusatzstoff
Nr.	S1	S2	$Ca(OH)_2$	$Al_{(Pulver)}$	$Al_{(Granulat)}$	SFA	HSM	
1	+	—	2/4/6	—	—	—	—	1:0
2	*	×	2/4/6	0,5/1/1,5	—	—	—	1: $\frac{1}{4}$
3	▲	△	2/4/6	—	0,5/1/1,5	—	—	1: $\frac{1}{4}$
4	●	○	2/4/6	—	—	4/8/12	—	1:2
5	■	□	2/4/6	—	—	—	4/8/12	1:2

Da es sich bei dem verwendeten Weißkalk CL80 um einen gelöschten Luftkalk handelt, der keine hydraulischen Eigenschaften aufweist [10], sollte durch die geeignete Wahl der Zusatzstoffe ein quasi hydraulisch erhärtendes Bindemittel zum Einsatz kommen. Als Hauptkriterium für die Auswahl eines optimalen Bindemittelgemisches dient die einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

Die Festigkeiten wurden an jeweils 4 Probekörpern einer Gemischkombination ermittelt. Zur Herstellung der Probekörper wurde das in Abschnitt 6.1.5 beschriebene Druckverdichtungsverfahren gewählt. Die Einbaumassen basieren auf Feuchtdichten ϱ_f aus Proctorversuchen mit Erdstoff-Kalk-Gemischen. Hierzu wurde in Anlehnung an die Proctorversuche des Abschnitts 6.2.2 jeweils ein Proctorversuch mit den in Tabelle 6.9 dargestellten Parametern durchgeführt.

Tabelle 6.9: Parameter der Proctorherstellung mit Erdstoff-Kalk-Gemischen

Wassergehalt w in [%]	Verdichtungsarbeit W in $[MNm/m^3]$	CL80-Anteil m in $[M - \%]$
24	1,2	2
26	1,2	4
28	1,2	6

Die gewählte doppelte Standardverdichtungsarbeit soll den Einfluss des Wassergehaltes auf die Festigkeiten, wie in Abschnitt 6.2.2.2 demonstriert, minimieren. Die dargestellten Wassergehalte entsprachen bei der Probekörperherstellung dem Erdstoff-Zusatzstoff-Gemisch, damit unabhängig von der Gemischkombination die gleichen Wasseranteile dem Abbindevorgang des Kalkes zur Verfügung standen.

In Anlehnung an die Vorgaben nach [26] wurde die 28 tägige Lagerung der Probekörper in zwei Phasen in einem programmierbaren Klimaschrank durchgeführt. In der ersten sieben-

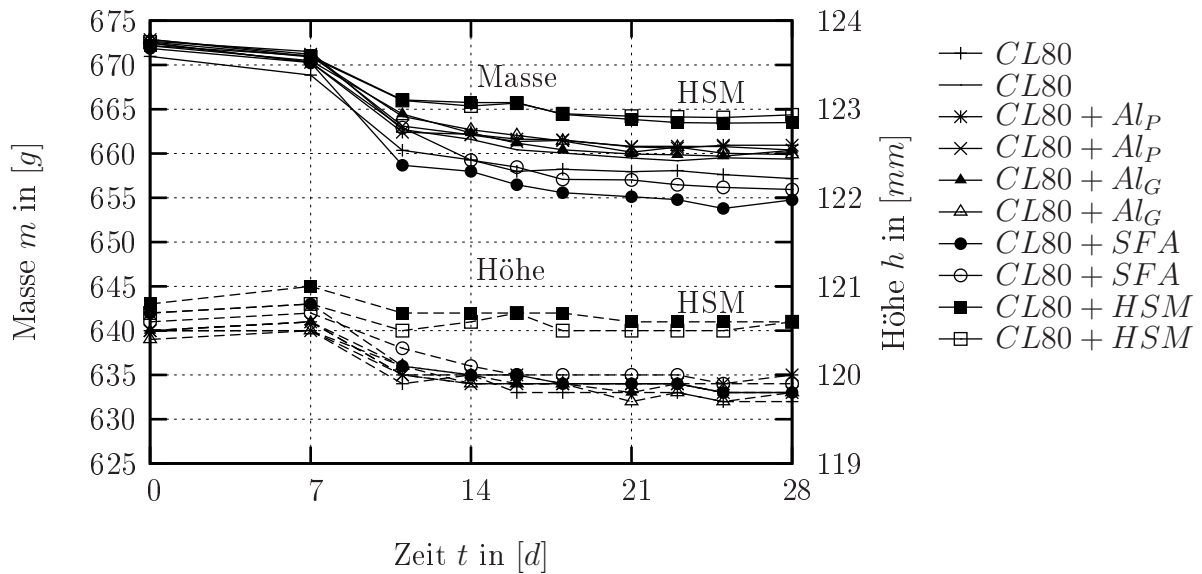


Bild 6.39: Massen- und Höhenverlauf der Probekörper $K40-49$, mit einem 4-prozentigem Kalkanteil, während der Lagerung im Klimaschrank

tägigen Phase wurden die luftdicht verpackten Proben bei einer Temperatur von 40°C und einer relativen Luftfeuchte von 98% gelagert. Die anschließende zweite Phase umfasste die Lagerung der unverpackten Körper bei gleicher Luftfeuchte, jedoch bei einer verminderten Temperatur von 20°C . In Bild 6.39 ist exemplarisch der, für alle Messungen ähnliche, Massen- und Höhenverlauf einer Serie von den Gemischkombinationen dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass die Probekörper mit Hüttensandmehlanteil sowohl die beste Masse- als auch Raumbeständigkeit aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass diese Gemischkombination ein großes Wasserbindevermögen und eine stabile Erdstoffgemischstruktur besitzt. Die einaxialen Druckversuche bestätigen die erhöhte Verfestigungsneigung.

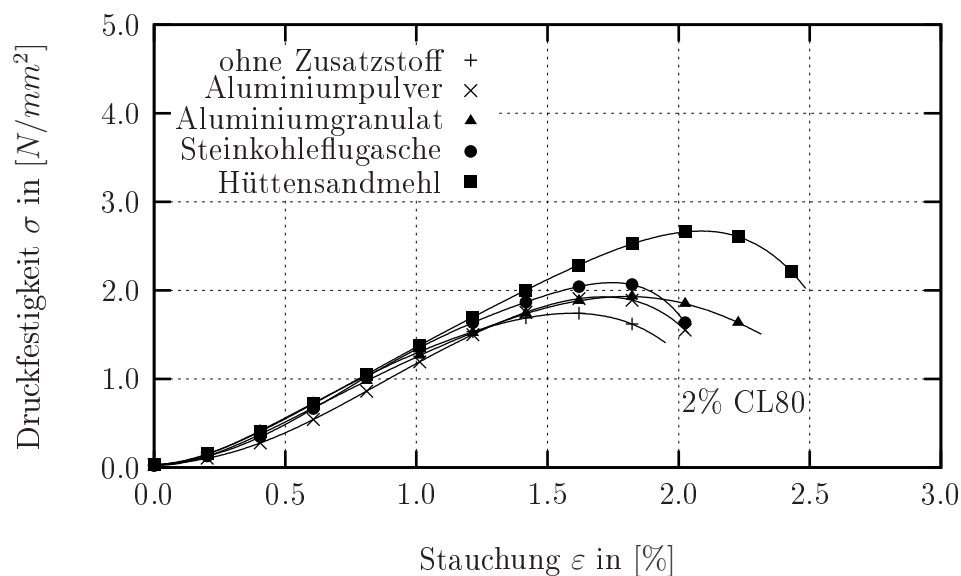


Bild 6.40: Druckfestigkeit der Probekörper nach 28 Tagen mit 2-prozentigem Kalkanteil

In den Bildern 6.40 bis 6.42 sind die einaxialen Druckfestigkeiten der Gemischkombina-

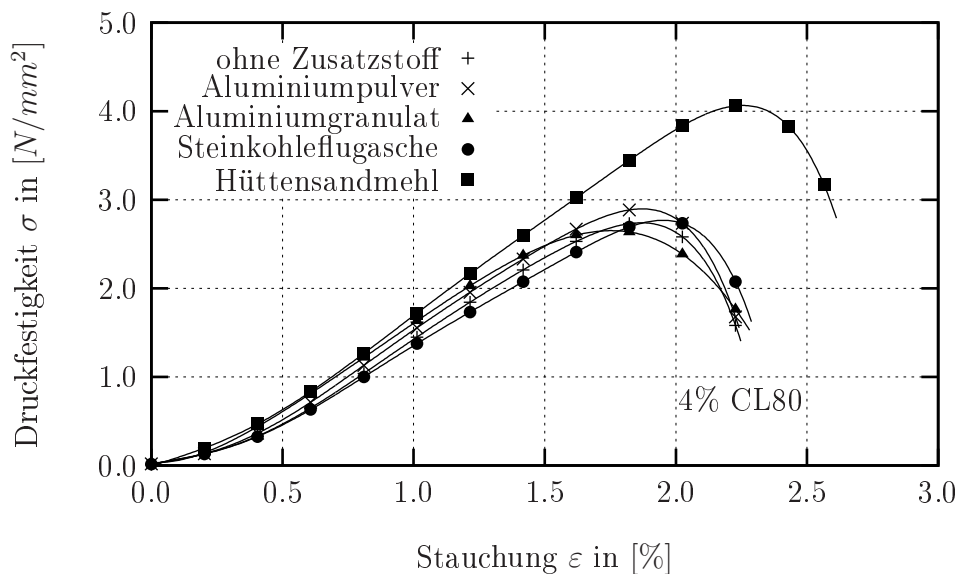


Bild 6.41: Druckfestigkeit der Probekörper nach 28 Tagen mit 4-prozentigem Kalkanteil

tionen dargestellt. Die Prüfkraft wurde wiederum mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 0,2% der Probenanfangshöhe pro Minute aufgebracht. Die Druckfestigkeiten der Gemische mit Hüttensandmehlzusatz erzielen jeweils die Maximalwerte. In Bild 6.42 wurde die Festigkeit des Erdstoff-Kalk-Gemisches ohne Zusatzstoff als Basis definiert, sodass für das Erdstoff-Kalk-Hüttensand-Gemisch eine Festigkeit von etwa 160% abgelesen werden kann.

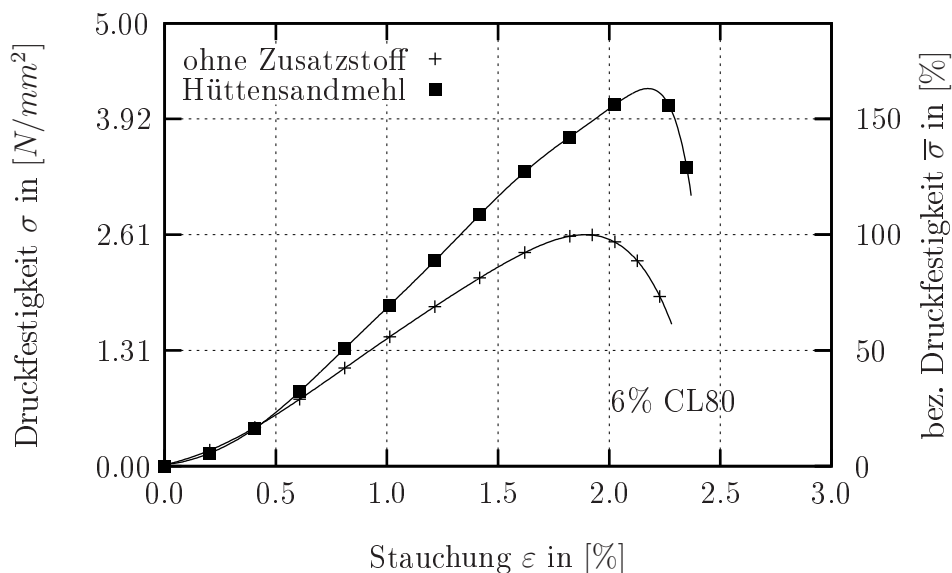


Bild 6.42: Druckfestigkeit der Probekörper nach 28 Tagen mit 6-prozentigem Kalkanteil

Die Untersuchungen der Gemische ergibt, dass durch den Zusatz von Hüttensandmehl zum Erdstoff besonders hohe Festigkeitssteigerungen erzielt werden können. Im Vergleich zur Stabilisierung mit Kalk ohne Zusatzstoff wurden durchschnittlich 50% höhere Bruchspannungen erreicht. In Tabelle 6.10 sind diese Druckfestigkeiten angegeben. Während der Festigkeitszuwachs zwischen 2%-igem und 4%-igem Kalkanteil besonders markant ist,

fallen die Unterschiede zwischen 4%-igem und 6%-igem Kalkanteil nur noch minimal aus. In den weiteren Untersuchungen wird aufgrund der erzielten Druckfestigkeiten näher auf Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Gemische eingegangen.

Tabelle 6.10: Vergleich der maximalen einaxialen Druckfestigkeiten zwischen Erdstoff-Kalk- und Erdstoff-Kalk-Hüttensand-Gemischen

Gemisch- kombination	Einaxiale Druckfestigkeit q_u bei einem CL80-Anteil von					
	2 M – %		4 M – %		6 M – %	
	in $[N/mm^2]$	in [%]	in $[N/mm^2]$	in [%]	in $[N/mm^2]$	in [%]
CL80	1,7417	100,0	2,7410	100,0	2,6144	100,0
CL80 + HSM	2,6704	153,3	4,0654	148,3	4,2639	163,1

6.3 Erdstoff-Kalk-Hüttensand-Gemische

Die vorhergehenden Versuche zeigen, dass für den verwendeten Erdstoff Kombinationen aus Hüttensandmehl und Kalkhydrat maximale Festigkeitssteigerungen zu erreichen sind. Deshalb wurden die Untersuchungen mit den in Tabelle 6.8 dargestellten Kombinationen aus Hüttensandmehl und Weißkalk CL80 fortgesetzt. Der Versuchsumfang beinhaltet im Wesentlichen die Erfassung der einaxialen Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen klimatischen Lagerungsbedingungen, die Veränderung der Plastizitätsgrenzen sowie direkte und indirekte Untersuchungen über die strukturelle Änderung des Erdstoffs.

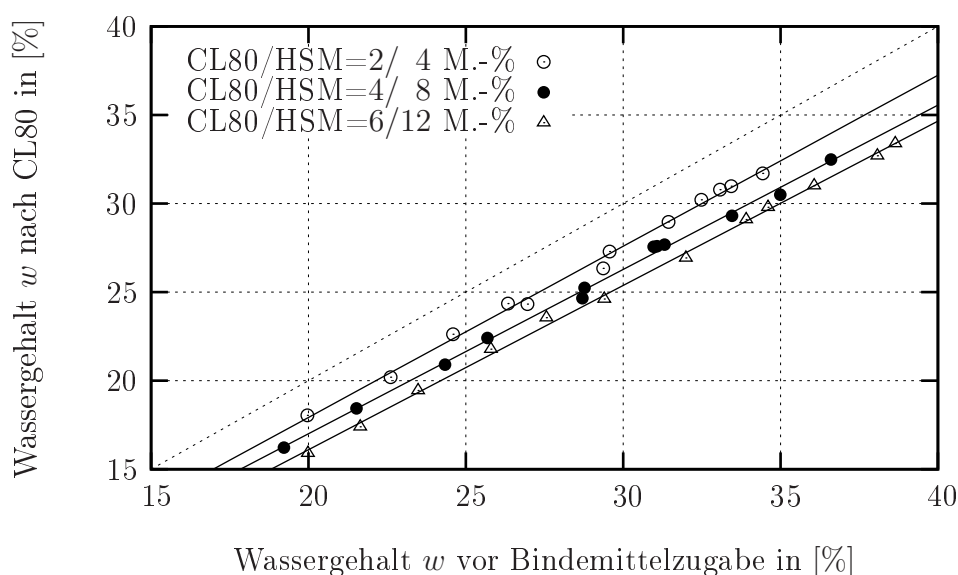


Bild 6.43: Wassergehaltsänderung infolge CL80-Zugabe nach einstündiger Reaktion (Kalkmenge bezogen auf das Trockengewicht des Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemisches)

Die Herstellung des Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Gemisches beruht auf zwei Schritten. Zuerst wird ein homogenes Gemenge aus dem zerkleinerten Erdstoff und dem Hüttensandmehl hergestellt. Dieses Ausgangsgemisch verweilt 24 Stunden in luftdicht verschlossenen

Gefäßen und liefert den Bezugswassergehalt. Im zweiten Schritt wird der Weißkalk CL80, entsprechend der Vorgehensweise des Abschnitts 6.1.1, diesem Gemisch beigemischt.

Im zuvor dargestellten Bild 6.43 ist die Reduktion des Wassergehaltes nach einstündiger Reaktion angegeben. Im Vergleich zu Bild 6.30 ist die Wassergehaltsreduktion nicht von der Feuchte des Ausgangsmaterials abhängig, sondern es findet eine nahezu konstante Parallelverschiebung der Wassergehaltsreduktionslinien statt. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass die Bindigkeit des Ausgangsgemisches abnimmt.

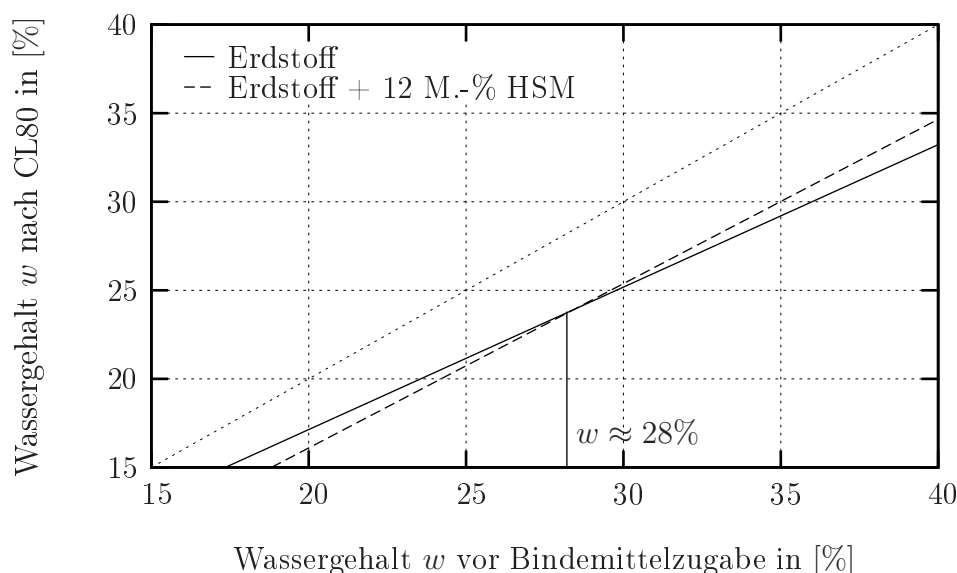


Bild 6.44: Wassergehaltsänderung infolge 6%-iger CL80-Zugabe nach einer Stunde

In Bild 6.44 sind die Wassergehaltsänderungen für den Erdstoff und für das Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemisch bei 6%-iger Kalkzugabe dargestellt. Die Linie des Erdstoffs nähert sich mit abnehmender Feuchte, verbunden mit steigenden Kohäsion, der Diagonalen an. Hierdurch verringert sich das Verhältnis des ungebundenen Porenwassers zur Adsorptionswasserschicht der Tonminerale. Da die optimale Reaktion des Kalkes freies bzw. loses gebundenes Wasser bedingt, verringert sich die Wassergehaltsreduktion. Die Linien des Erdstoffs und des Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemisches schneiden sich bei einem Wassergehalt von etwa 28%.

Obwohl im Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemisch der Anteil des freien bzw. losen gebundenen Wassers größer ist als im Erdstoff, unterschreitet die Wassergehaltsabnahme bei Wassergehalten $w > 28\%$ die des Erdstoffs. Als Ursache hierfür kann die zusätzliche Beteiligung des Hüttensandmehls an der Reaktion des Kalkes angesehen werden.

Die einsetzende chemische Reaktion ist exotherm. Die Prozesswärme ist hierbei von der zugegebenen Kalkmenge und auch vom Wassergehalt des Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemisches abhängig. In Bild 6.45 sind die Temperaturverläufe für die drei untersuchten Gemischkombinationen, eine Stunde nach Bindemittelzugabe, dargestellt. Im Mittel tritt eine Temperaturerhöhung von 2°C je zugegebenem Masseprozent Kalkhydrat auf. Je höher der Kalkanteil ist, desto größer wird der Einfluss des Wassergehaltes des Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemisches auf die Reaktionstemperaturänderung $\Delta T(w)$. Die

Wassergehaltsbereiche der maximalen Temperaturerhöhungen fallen jedoch nicht mit den Wassergehaltsbereichen zur Erzielung der maximalen Festigkeiten zusammen.

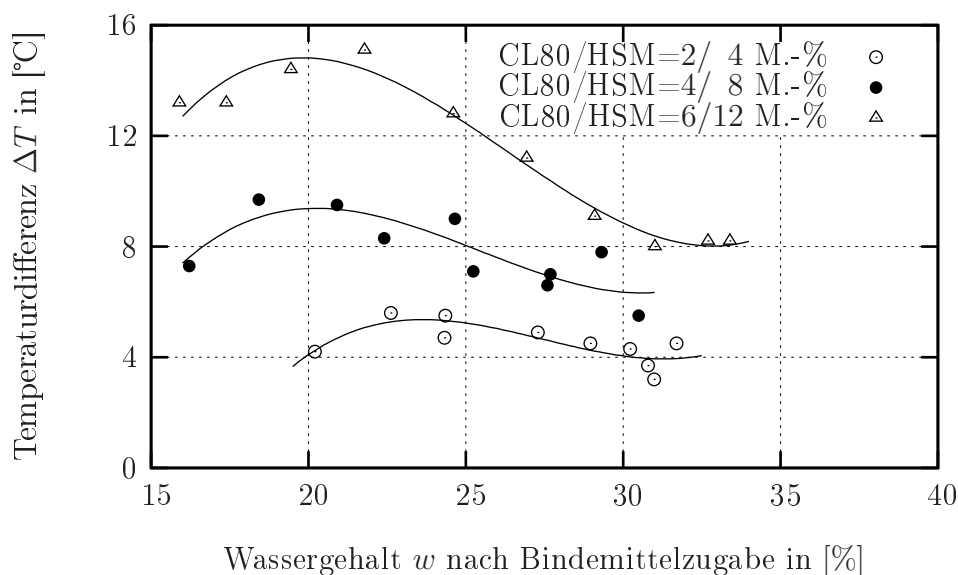


Bild 6.45: Temperaturänderung ΔT infolge CL80-Zugabe zum Erdstoff-Hüttensand-Gemisch nach einstündiger Reaktion

6.3.1 Proctorversuche

Die durchgeführten Proctorversuche dienen der Ermittlung des optimalen Wassergehaltes w_{proc} und der maximal erzielbaren Dichte ρ des Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Gemisches. Die ausgeführten Verdichtungsarbeiten entsprechen der in *DIN 18127* angegebenen Standardarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ und zusätzlich einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$. Die Methodik der Herstellung und die Anzahl der Einbauschichten der Proctorkörper wurde entsprechend den Angaben des Abschnitts 6.1.1 und mit den Parametern der Tabelle 6.1 ausgeführt. Die ermittelten Proctorkennwerte der nachstehenden Tabelle 6.11 stellen die Grundlage für das in Abschnitt 6.3.2.1 angewandte Druckverdichtungsverfahren dar.

Tabelle 6.11: Proctorkennwerte der Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Gemische

Gemischkombination CL80/HSM in [M – %]	$W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$		$W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$	
	w_{proc} in [%]	ρ in [g/cm^3]	w_{proc} in [%]	ρ in [g/cm^3]
2/ 4	31,5	1,895	27,5	1,970
4/ 8	32,5	1,885	29,0	1,965
6/12	33,5	1,875	30,5	1,930

Die optimalen Wassergehalte w_{proc} des Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemisches weichen zwischen den einzelnen Gemischkombinationen um 1% bei der Standardverdichtung und um 1,5% bei der Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ ab. In Bild 6.46 sind die Proctorkurven für die Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ dargestellt. Mit zunehmendem

Kalk-Hüttensandmehlanteil verringern sich die im Proctorversuch erzielbaren Dichten, bei gleichzeitiger Verschiebung der optimalen Wassergehalte in Richtung feuchterer Ausgangsgemische. Zusätzlich flachen die Kurven mit steigendem Kalk-Hüttensandmehlanteil ab, sodass geringe Schwankungen von bis zu 2% um den optimalen Wassergehalt in der Regel nur minimale Auswirkungen auf die erzielbare Dichte haben.

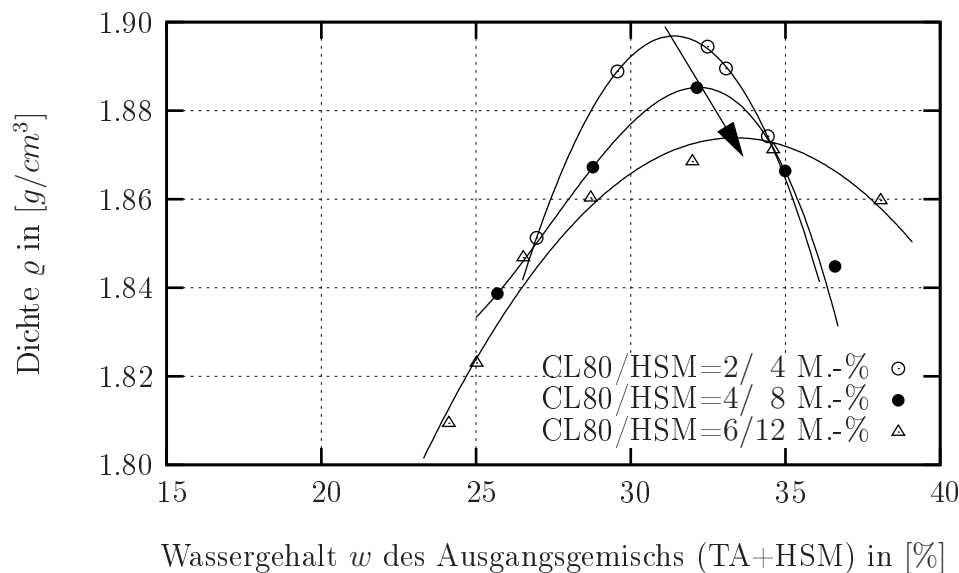


Bild 6.46: Dichte im Proctorversuch bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Wassergehalt bezogen auf das Ausgangsgemisch)

Es ist vorteilhaft, die Wassergehalte in den Diagrammen auf das Ausgangsgemisch zu beziehen, da hierdurch der reale, unverzehrte Wasseranspruch erfasst wird. Der Ausgangswassergehalt kann vor der Bindemittelzugabe einfach überprüft und gegebenenfalls reguliert werden. Weiterhin unterliegt die eintretende Wassergehaltsreduktion gewissen Schwankungen.

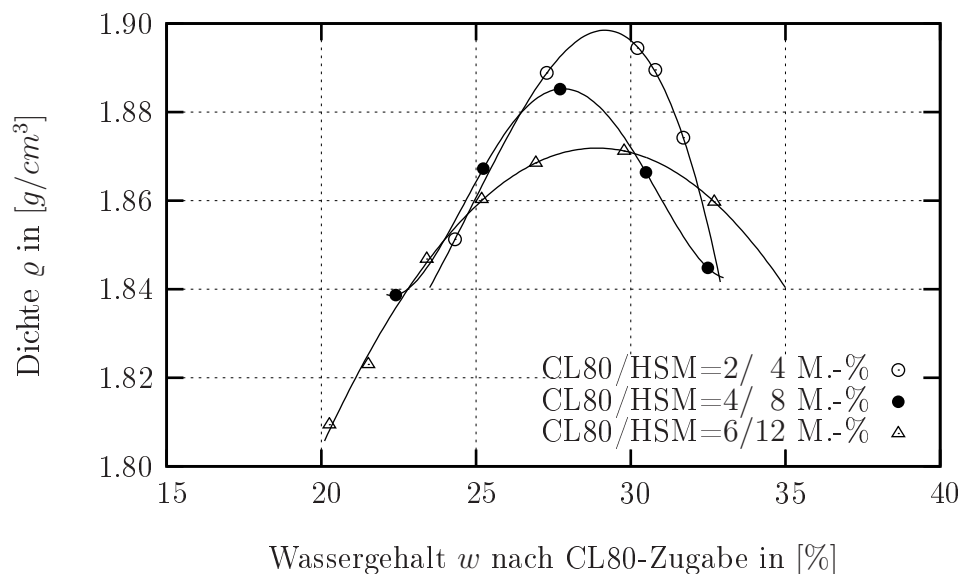


Bild 6.47: Dichte im Proctorversuch bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Wassergehalt nach Bindemittelzugabe)

Zum Vergleich sind in Bild 6.47 die Proctorkurven bezogen auf den Wassergehalt nach der Bindemittelzugabe dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Wassergehaltsreduktion durch die gewählten Kalkmengen kommt es zu ungleichmäßigen Verschiebungen der Kurven untereinander. Werden die in Bild 6.43 dargestellten Linien der Wassergehaltsänderungen auf das Bild 6.46 angewendet, so weichen hiernach die optimalen Wassergehalte der einzelnen Gemischkombinationen weniger als 0,5% voneinander ab.

In Bild 6.48 ist die Proctorkurve des Erdstoffs sowie die Proctorkurven für die Gemische bei minimaler und maximaler Kalkzugabe für die erhöhte Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ dargestellt. Hierin wird wiederum die Abnahme der Dichte bei gleichzeitiger Zunahme des optimalen Wassergehaltes sowie die Kurvenstauchung mit steigendem Bindemittelanteil deutlich.

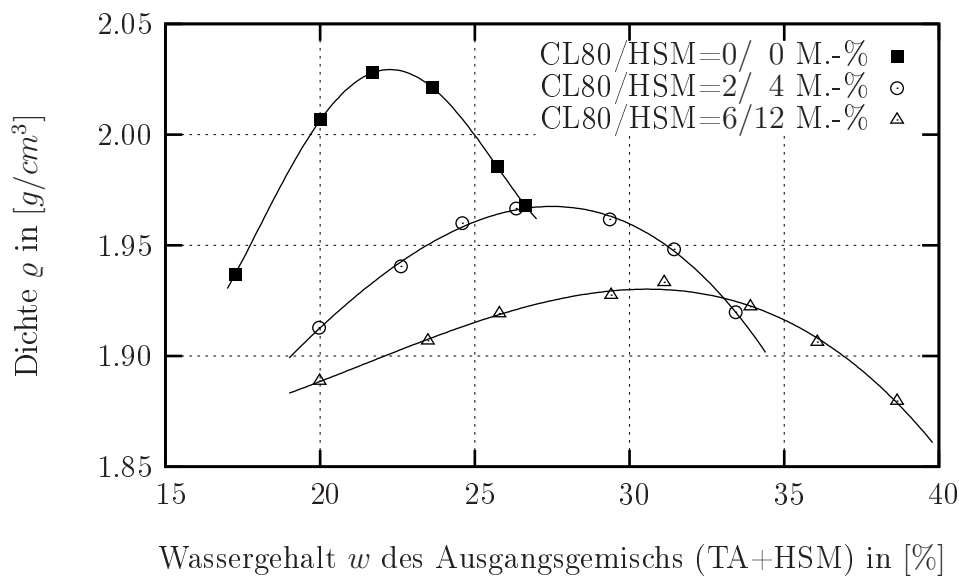


Bild 6.48: Dichte im Proctorversuch bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Wassergehalt bezogen auf das Ausgangsgemisch)

Im Vergleich zur Standardverdichtungsarbeit werden höhere Dichten bei verminderten optimalen Wassergehalten erzielt. Die Verschiebungen der Proctorkurven untereinander fallen sowohl in Bezug auf den optimalen Wassergehalt als auch auf die maximalen Dichten größer aus als bei $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$. Die in der Bodenmechanik übliche Kenngröße der Trockendichte aus den Proctorversuchen konnte für das Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Gemisch nicht ermittelt werden. Die hierfür benötigten Wassergehalte liegen unterhalb der Feuchte, die für den inneren Verbund der Probekörper benötigt wird.

Nach der Herstellung der Proctorkörper wurden diese entsprechend den Angaben der Technischen Prüfvorschriften [26] in einem programmierbaren Klimaschrank gelagert. Hierbei wurden die in Folie verpackten Körper eine Woche einer Temperatur von 40°C und anschließend drei Wochen im unverpackten Zustand einer Temperatur von 20°C ausgesetzt. Die relative Luftfeuchte betrug während der Lagerung 98%. Im Anschluss an die 28-tägige Lagerung wurde entsprechend Bild 6.11 die Anpassung der Probekörperabmessungen auf $h/d = 120/60 \text{ mm}$ sowie einaxiale Druckfestigkeitsprüfungen nach *DIN 18136* durchgeführt. In den Bildern 6.49 und 6.50 kann der Zusammenhang zwischen den einaxialen Druckfestigkeiten und dem Mengenanteil der Gemischkombination entnommen

werden. Die in Bild 6.49 dargestellten Kurven zeigen, dass mit steigendem Wassergehalt die Verformungen zunehmen. Der geringe Bindemittel-Zusatzstoffanteil bewirkt schon hohe Festigkeiten, jedoch ist die Verformungswilligkeit des Erdstoffs in Abhängigkeit des Wassergehaltes auch bei hoher Verdichtung noch ausgeprägt.

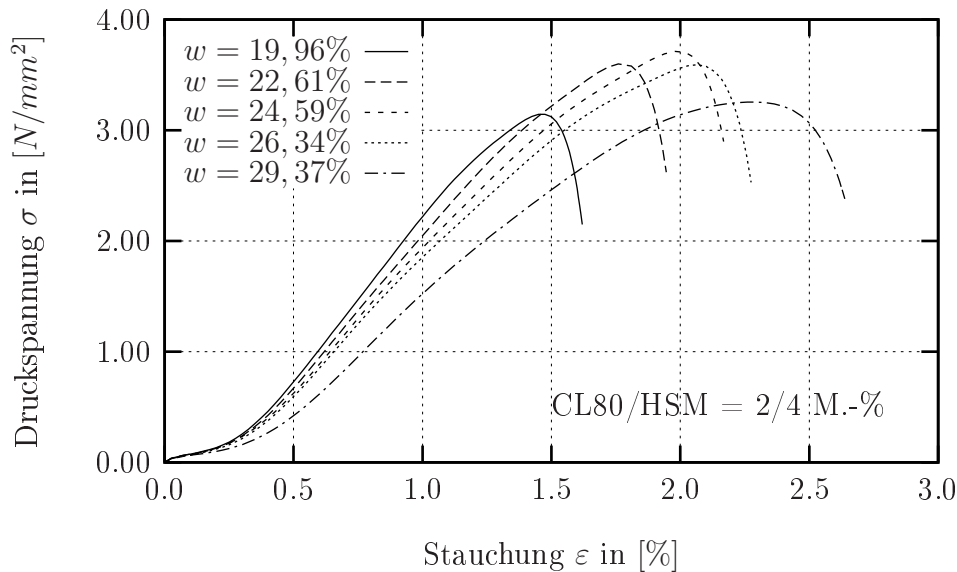


Bild 6.49: Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper nach 28 Tagen bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$

Wird der Bindemittel-Zusatzstoffanteil erhöht, wie in Bild 6.50 dargestellt, so verringern sich die Verformungen mit steigendem Wassergehalt. Liegen die Wassergehalte unterhalb des optimalen Wassergehaltes, so weisen die verdichteten Körper ein haufwerksporiges Gefüge auf. Die festen, granulatähnlichen Erdstoff-Bindemittelpartikel verringern vorerst durch den Pressvorgang den vorhandenen Porenraum und erfahren somit größere Relativverschiebungen. Die größten Festigkeiten treten um den optimalen Wassergehalt zur Erzielung der maximalen Dichte auf.

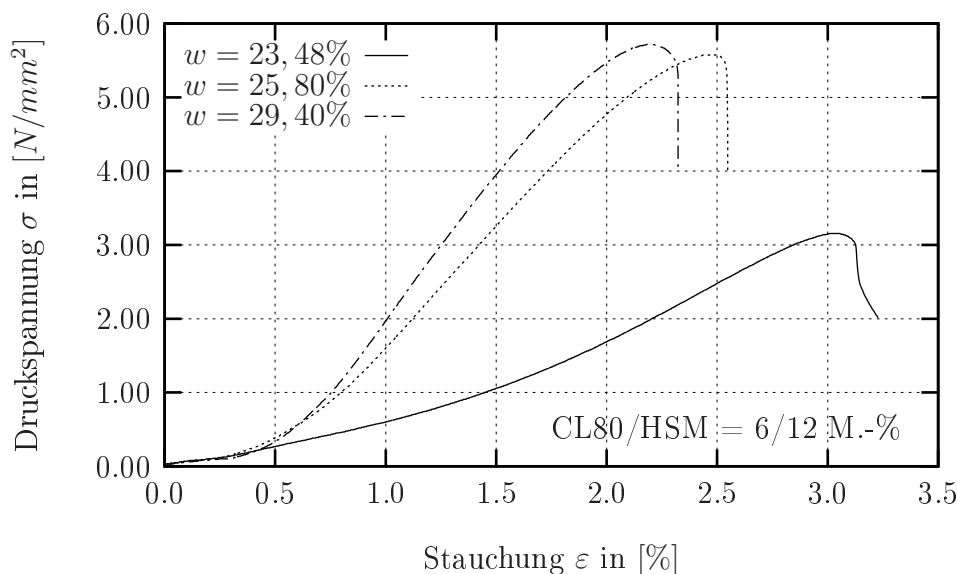


Bild 6.50: Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper nach 28 Tagen bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$

6.3.2 Einaxiale Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer und den klimatischen Bedingungen

Um klimatische Einflüsse auf das Verfestigungsverhalten der Gemischkombinationen aus Erdstoff, Hüttensandmehl und Kalk zu erfassen, wurden fünf unterschiedliche Lagerungsbedingungen untersucht. In Tabelle 6.12 sind die Dauer und die klimatischen Bedingungen der einzelnen Untersuchungsphasen dargestellt.

Tabelle 6.12: Lagerungsbedingungen und Prüfzeitpunkte der Probekörper

Serie Nr.	Lagerungsdauer t der Probekörper				Proben- alter $\sum t$ in [d]
	bei 98% rel. Feuchte und 40°C	und 20°C	im Wasserbad bei 20°C	mit Frost-Tau-Wechseln bei $\pm 20^\circ\text{C}$	
	t_1 in [d]	t_2 in [d]	t_3 in [d]	t_4 in Zyklen ¹⁾	
1	7	21	—	—	28
2	7	49	—	—	56
3	7	—	—	12	28
4	7	21	—	12	49
5	7	—	21	—	28

¹⁾ Ein Zyklus umfasst 24 Stunden. Während Sonn- und Feiertagen verlängert sich die Frostphase eines Zyklus' auf 2 bis 3 Tage.

Die Luftfeuchte und die Temperatur wurde mit einem programmierbaren Klimaschrank gesteuert. In Anlehnung an die Technischen Prüfvorschriften [26] waren die Probekörper in der Phase t_1 in Folie luftdicht verpackt und einer reaktionsbegünstigenden Temperatur von 40°C ausgesetzt. Anschließend wurde die Lagerung der Probekörper im unverpackten Zustand fortgeführt. Während des Versuchprogramms wurden die Massen, die Höhen sowie der visuelle Zustand der Probekörper erfasst.

6.3.2.1 Probekörperherstellung

Die für die folgenden Untersuchungen verwendeten Probekörper wurden mit dem im Abschnitt 6.1.5 beschriebenen Druckverdichtungsverfahren hergestellt. Die hierfür benötigten Wassergehalte und Dichten sind in Anlehnung an die Proctorwerte der Tabelle 6.11 gewählt worden.

Zur Einstellung der Wassergehalte der Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemische wurde ein rechnerischer Ansatz verwendet. Im ersten Schritt wurde der Wassergehalt des Erdstoffs ermittelt. Hiernach wurde die Trockenmasse des Erdstoffs berechnet, sodass die Zugabemenge des Hüttensandmehls bestimmt werden konnte. Für dieses Gemisch ist der Wassergehalt berechnet worden, mit der Annahme, dass das Hüttensandmehl keine Eigenfeuchte aufweist. Mit diesem theoretischen Wert kann die Trockenmasse des Gemisches berechnet werden sowie die Gesamtmasse für jeden gewünschten Wassergehalt. Über einen Massevergleich wurde dem Gemisch entweder Wasser zugesprüht oder über Verdunstung entzogen. Dieses Verfahren hat sich während der Untersuchungen bewährt und lieferte gute Genauigkeiten. Kleinere Abweichungen um den optimalen Wassergehalt wirken sich nicht

nennenswert auf die Versuchsergebnisse aus, wie in Abschnitt 6.3.1 gezeigt wurde. In Tabelle 6.13 sind die theoretisch gewählten Parameter für die Herstellung der Probekörper im Druckverdichtungsverfahren dargestellt.

Tabelle 6.13: Gewählte Parameter für das Druckverdichtungsverfahren

Gemisch CL80/HSM in $[M - \%]$	$W = 0,6 \text{ MNm}/\text{m}^3$					
	Wassergeh. w in $[\%]$	Lagen n	Lagenmasse m_n in $[g]$	Masse m in $[g]$	Volumen V in $[\text{cm}^3]$	Dichte ρ in $[\text{g}/\text{cm}^3]$
2/ 4	31,00	3	214,4	643,2	339,292	1,896
4/ 8	32,75	3	213,0	639,0	339,292	1,883
6/12	33,50	3	211,7	635,1	339,292	1,872
$W = 1,2 \text{ MNm}/\text{m}^3$						
2/ 4	27,50	3	222,5	667,5	339,292	1,967
4/ 8	29,50	3	221,8	665,4	339,292	1,961
6/12	31,50	3	219,0	657,0	339,292	1,936

Die Ausgangsmasse jeder Gemischkombination wurden so gewählt, dass hieraus jeweils drei druckverdichtete Probekörper mit einheitlichem Wassergehalt hergestellt werden konnten. Die Dichten der Probekörper sind aufgrund der definierten Einbaumassen nahezu identisch ausgefallen. In Bild 6.51 sind exemplarisch die Wassergehalte und Dichten von ausgewählten Probekörpern dargestellt. Hierin zeigt sich, dass mit dem zuvor erläuterten Annahmen optimale Wassergehalte des Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemisches eingestellt werden konnten. Die Dichten aller druckverdichteten Probekörper lagen minimal über den angestrebten Proctordichten. Während der Vorversuche zeigte sich, dass nach Beendigung des Pressvorgangs die Probekörper aufgrund der Entlastung einen geringfügigen Höhenzuwachs aufwiesen. Um möglichst exakte Dichte zu erzielen, wurde daher eine Distanzscheibe in den Druckzylinder eingelegt, sodass die durchschnittliche Probekörperhöhe nach Entlastung 119,5 mm betrug und somit geringfügig höhere Dichten auftraten.

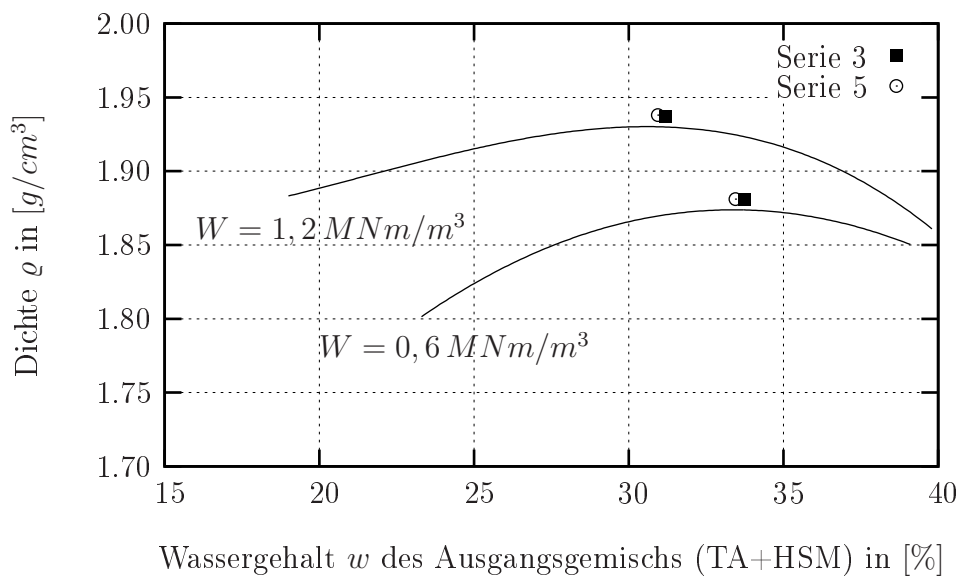


Bild 6.51: Proctorkurven für die Gemischkombination CL80/HSM = 6/12 M - % und Kennwerte von Probekörpern bei Herstellung im Druckverdichtungsverfahren

6.3.2.2 Einaxiale Druckfestigkeiten der Serie 1 und 2

Die einaxialen Druckfestigkeitsprüfungen wurden an je drei druckverdichteten Probekörpern einer Gemischkombination durchgeführt. Die Dichten und die Wassergehalte dieser Körper entsprechen den im Proctorversuch ermittelten optimalen Kennwerten für die Verdichtungsarbeiten von $W = 0,6 \text{ MNm}/\text{m}^3$ und $W = 1,2 \text{ MNm}/\text{m}^3$. Die Probekörper wurden mit den in Tabelle 6.12 angegebenen klimatischen Bedingungen gelagert. In den Bildern 6.52 und 6.53 sind die einaxialen Druckfestigkeiten der Probenserie 1 nach 28 Tagen dargestellt. Die stärker verdichteten Probekörper weisen für die gleiche Gemischkombination erhöhte Bruchspannungen und Bruchstauchungen auf, bei nahezu identischen E-Moduln.

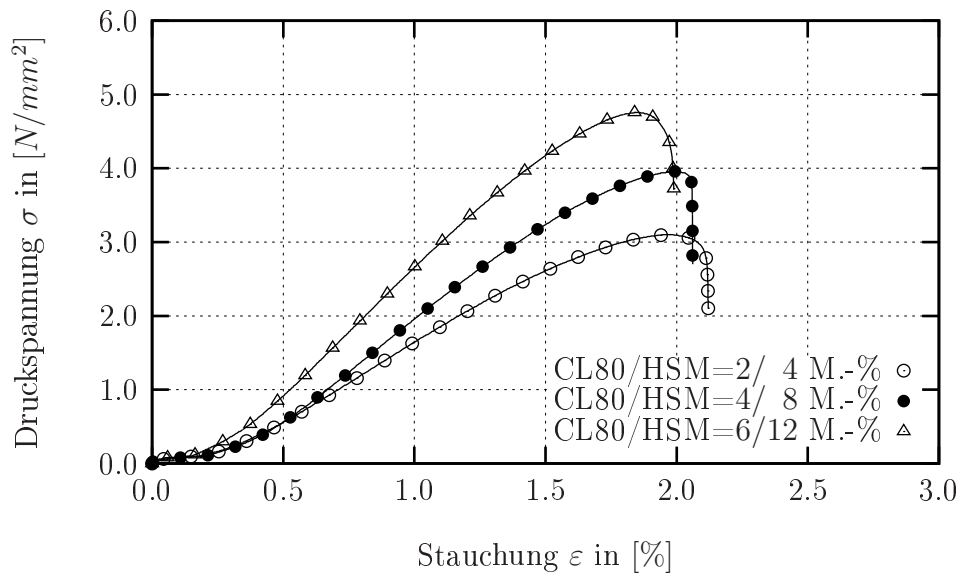


Bild 6.52: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm}/\text{m}^3$ (Serie 1)

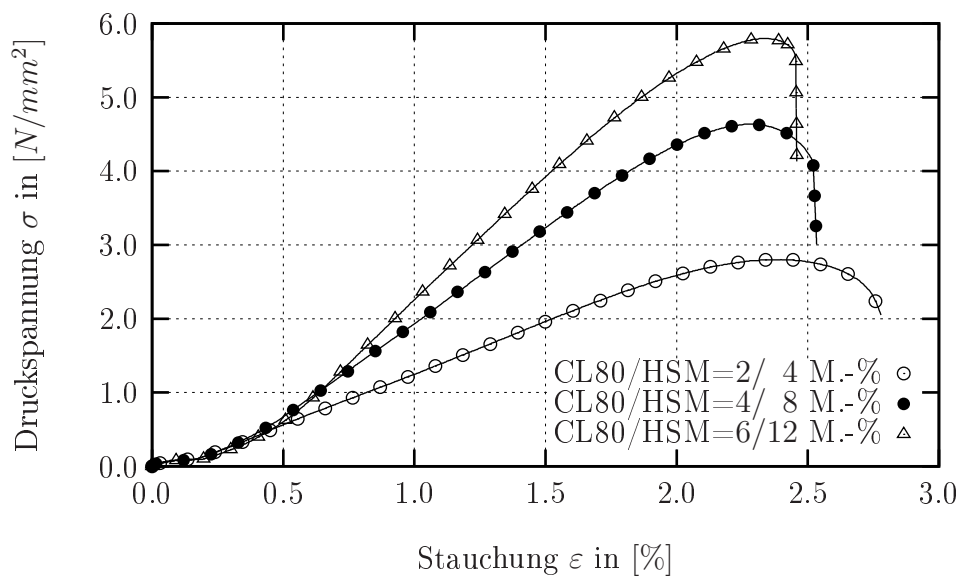


Bild 6.53: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm}/\text{m}^3$ (Serie 1)

Die einaxialen Druckfestigkeiten der Probenserie 2 nach 56 Tagen sind in den Bildern 6.54 und 6.55 dargestellt. Wiederum ist zu erkennen, dass nur ein geringer Einfluss der Verdichtungsarbeit auf die E-Moduln vorhanden ist. Die erhöhten Druckfestigkeiten haben auch hier vergrößerte Bruchstauchungen zur Folge.

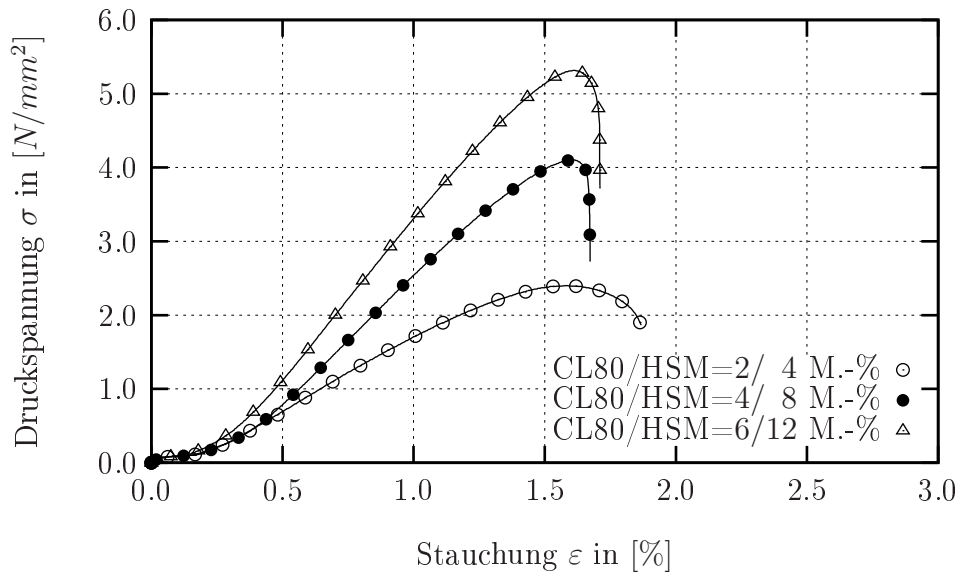


Bild 6.54: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 56 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 2)

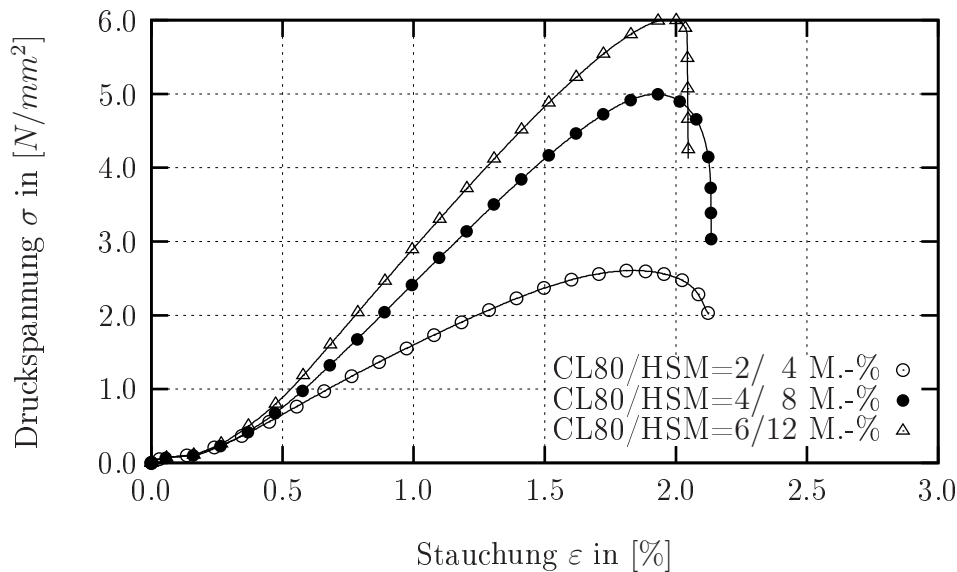


Bild 6.55: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 56 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 2)

Im Vergleich zur Probenserie 1 weisen die Probekörper bei doppelter Lagerungsdauer nahezu identische Druckfestigkeiten auf, jedoch bei verminderten Bruchstauchungen. Die erhöhten E-Moduln der Serie 2 werden durch die fortschreitenden, verfestigenden Erdstoff-Kalk-Reaktionen hervorgerufen. Das keine Druckfestigkeitszuwächse eintreten zeigt, dass die verfestigte Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Struktur nur bis zur einer maximalen Spannung belastet werden kann. Diese Versagensgröße bildet sich bei den dargestellten Kurzzeit-

versuchen bereits nach 28 Tagen in vollem Umfang aus. In Bild 6.56 ist dieses Verhalten dargestellt. Auch die dynamisch verdichteten Proctorkörper im Bereich des optimalen Wassergehaltes des Bildes 6.50 weisen identische Bruchspannungen auf, sodass die Verdichtungsart auf diesen Grenzwert keinen wesentlichen Einfluss hat.

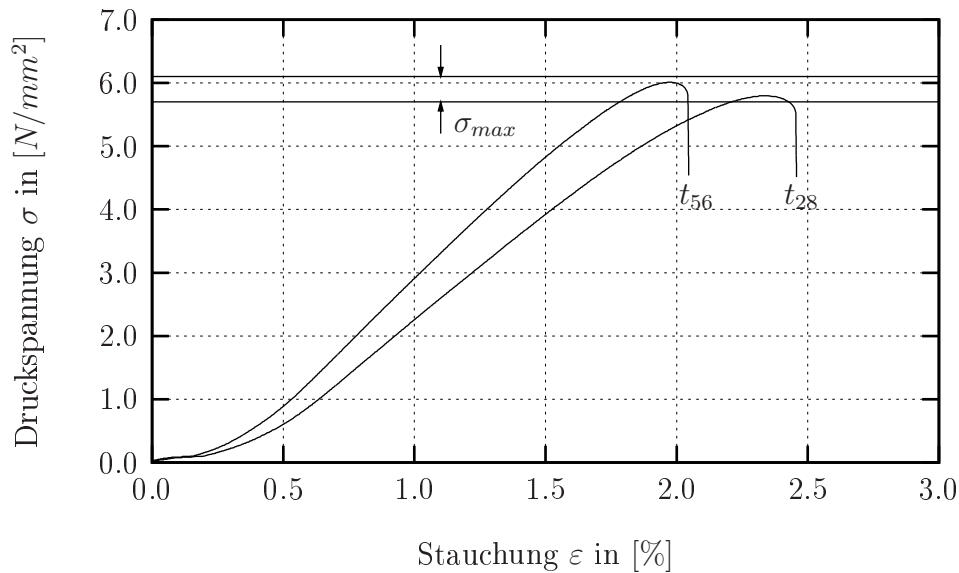


Bild 6.56: Vergleich der Druckfestigkeiten nach 28 und 56 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ bei der Gemischkombination CL80/HSM= 6/12 M.-%

In Bild 6.57 sind exemplarisch die Massen- und Höhenentwicklung der Probekörper einer Gemischkombination während der Lagerung im Klimaschrank dargestellt. Die sprunghafte Masseabnahme nach sieben Tagen beruht auf der ermöglichten Verdunstung der Oberflächenfeuchte der Probekörper, da zu diesem Zeitpunkt die Folienverpackungen entfernt wurden.

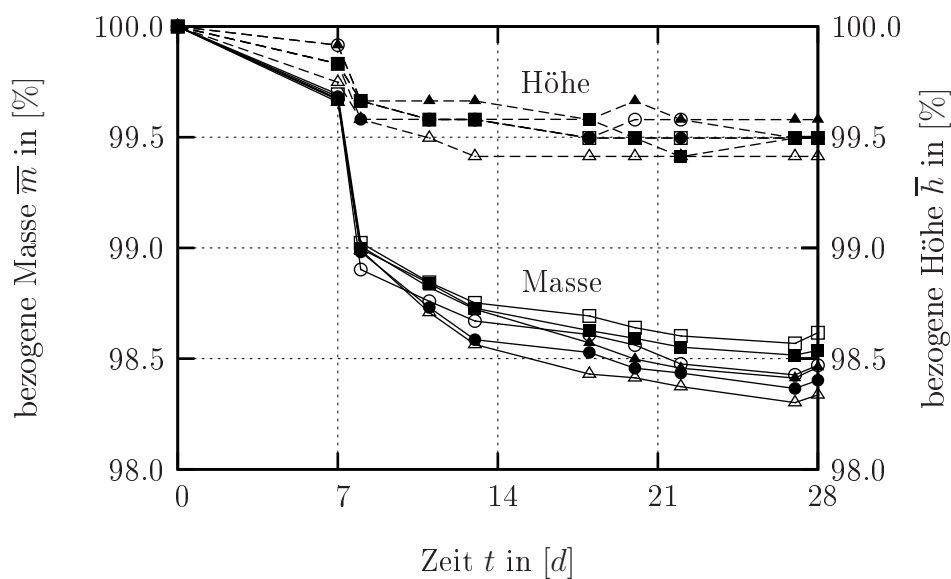


Bild 6.57: Massen- und Höherverlauf der Gemischkombination CL80/HSM= 2/4 M.-% für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$

Die prozentualen Massen- und Höhenverläufe, bezogen auf den Herstellungszeitpunkt der Probekörper, ergaben: Je höher der Kalkanteil ist, desto eher stellt sich eine Massekonstanz ein und um so geringer fallen die prozentualen Masseverluste aus. In Tabelle 6.14 sind die gemittelten Massen und Höhen dargestellt.

Tabelle 6.14: Prozentuale Massen und Höhen nach 28 Tagen bezogen auf die Ausgangswerte zum Herstellungszeitpunkt der Probekörper

Gemisch- kombination CL80/HSM in $[M - \%]$	Verdichtungsarbeit der Probekörper mit			
	$W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$		$W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$	
	Masse	Höhe	Masse	Höhe
	\bar{m} in $[\%]$	\bar{h} in $[\%]$	\bar{m} in $[\%]$	\bar{h} in $[\%]$
2/ 4	98,47	99,50	97,12	99,67
4/ 8	98,95	99,81	98,53	99,76
6/12	99,26	99,82	98,76	99,76

Die Ausprägung der Oberfläche der Probekörper ist in Bild 6.58 dargestellt. Das vorhandene Gefüge ist aufgrund der hohen Verdichtung bei beiden Proben sehr homogen ausgebildet. In Bild 6.58 (links) sind nur wenige oberflächige Kalkstrukturen zu erkennen. Bei der erhöhten Reaktionsdauer des Bildes 6.58 (rechts) werden kristallisierte Kalkverbindungen in den Poren sichtbar. Diese verkitten die Erdstoffpartikel und bewirken eine höhere Steifigkeit verbunden mit zunehmenden E-Moduln im Vergleich zu kürzeren Reaktionsdauern.

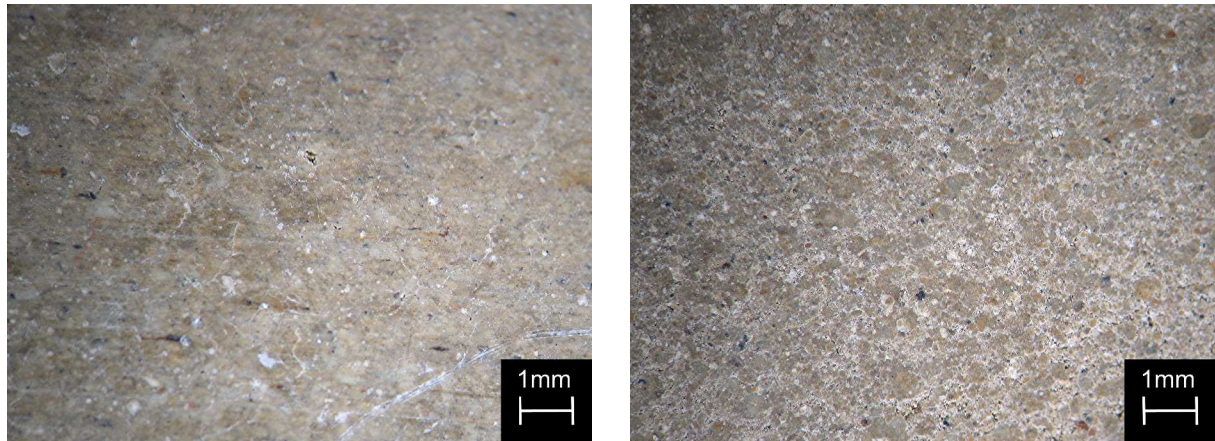


Bild 6.58: Probenoberfläche der Gemischkombination CL80/HSM=6/12% bei 28-tägiger (links) und bei 56-tägiger Lagerung im Klimaschrank (rechts) und einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$

Aufgrund der bereits nach 28 Tagen ausgeprägten Festigkeit der Sofortreaktion des Kalkes mit dem Erdstoff und Hüttensandmehl weichen die Bruchspannungen der Serien 1 und 2 jedoch nur unwesentlich von einander ab.

6.3.2.3 Einaxiale Druckfestigkeiten der Serien 3 und 4

Bodenbehandlungsmaßnahmen sollen nach den ZTVE [27] bis spätestens zwei Monate vor Eintreten des ersten Frostes ausgeführt werden. Um diese praxisrelevanten Vorgaben zu erfassen, wurden daher unterschiedliche Zeitpunkte der ersten Frostbelastung gewählt. Während die Lagerung der Probekörper der Serie 3 den zeitlichen und klimatischen Vorgaben nach [26] entspricht, findet in der Probenserie 4 die erste Frostbelastung nach 28 Tagen statt. In den Bildern 6.59 und 6.60 sind die einaxialen Druckfestigkeiten der Probenreihe 3 nach 28 Tagen mit 12 Frost-Tau-Wechseln dargestellt.

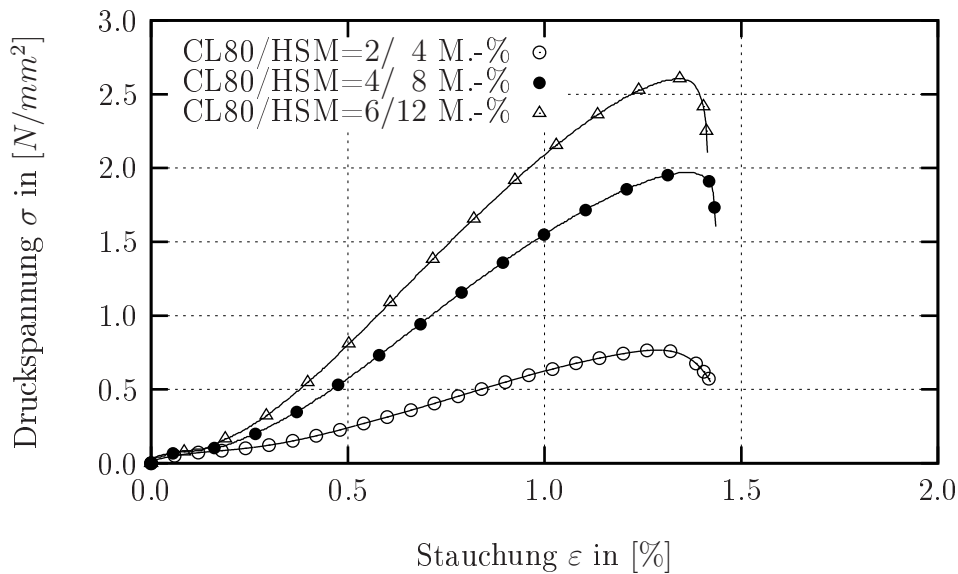


Bild 6.59: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 3 - Frost-Tau-Wechsel nach 7 Tagen)

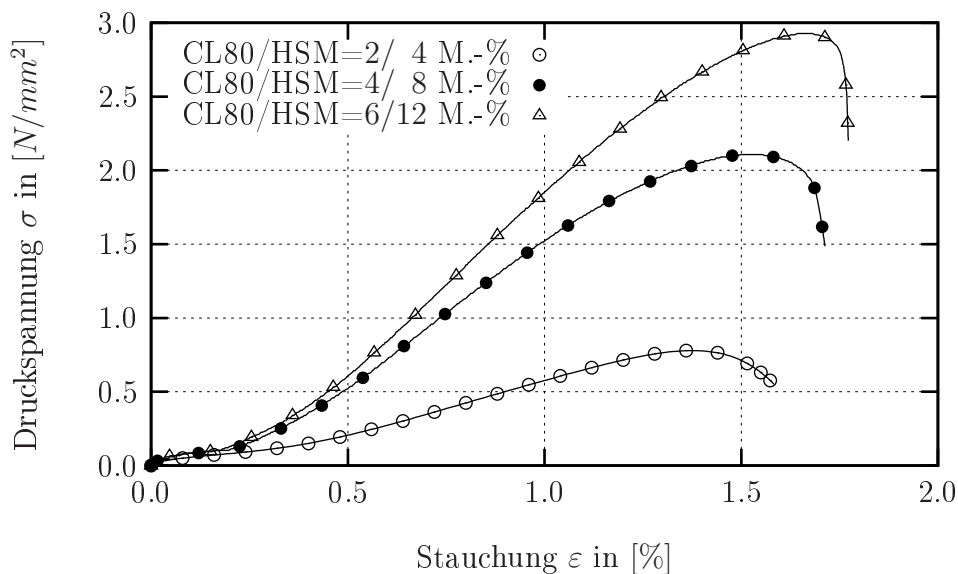


Bild 6.60: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 3 - Frost-Tau-Wechsel nach 7 Tagen)

Während die Festigkeiten der Gemischkombinationen mit 4- und 6%-igem Kalkanteil noch

jeweils 50% der Druckfestigkeiten der Serie 1 aufweisen, liegen die einaxialen Druckfestigkeiten der Gemischkombination mit 2%-igem Kalkanteil unterhalb eines Drittels der Festigkeiten ohne Frost-Tau-Wechsel. Aus dieser Interpretation folgt eine wichtige Erkenntnis: Der Kalkanteil einer Bodenverfestigung, auch in Kombination mit Hüttensandmehl, sollte mindestens 4 Prozent der Erdstofftrockenmasse betragen.

Der Einfluss der Verdichtungsintensität bei der Probekörperherstellung ist wiederum nur in den Bruchstauchungen und nicht in den E-Moduln zu erkennen. Die Festigkeitssteigerungen bei doppelter Verdichtungsarbeit fallen nur geringfügig, mit weniger als $0,5 \text{ N/mm}^2$ aus. Ausgenommen hiervon ist die frostungeignete Gemischkombination mit 2%-igem Kalkanteil, die aufgrund fehlender klimatischer Resistenz unabhängig von der gewählten Verdichtungsintensität versagt.

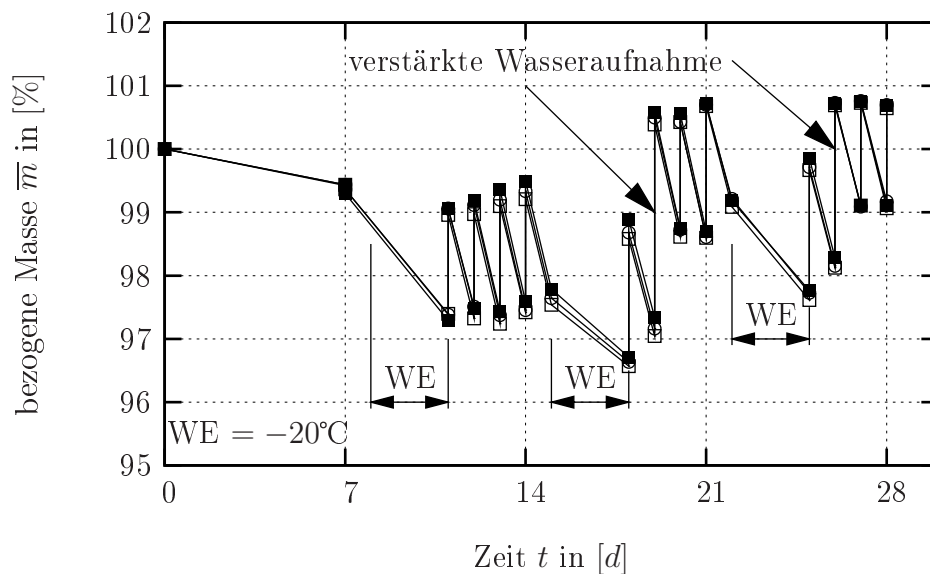


Bild 6.61: Prozentualer Massenverlauf von Probekörpern während der Lagerung im Klimaschrank (Frost-Tau-Wechsel)

In Bild 6.61 sind die prozentualen Massenverläufe einer Probereihe der Gemischkombination CL80/HSM=4/8% mit einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ während der Frost-Tau-Lagerung im Klimaschrank dargestellt. Der angegebene Verlauf ist typisch für die Probenserie 3. Die Frostphase ist durch Massenabnahme und die Tauphase durch Massenzunahme gekennzeichnet. Die stärksten mechanischen Beanspruchungen infolge Frost treten im unter Bereich der Probekörper auf, da aufgrund der kapillaren Wasseraufnahme in der Tauphase eine starke Durchfeuchtung dieser Zone erfolgt. Während der Dauerfrostbelastung an den Wochenenden (WE) bildeten sich infolge der Volumenzunahme des gefrorenen Wassers Haarrisse an der Aufstandsfläche der Probekörper aus, die sich im Inneren fortsetzen. Aufgrund der alternierenden Aufstandsfläche wirkt sich die hierdurch bedingt vergrößerte Kapillarität erst einen Zyklus später aus. In Bild 6.61 wird dieses Verhalten deutlich. Infolge der erhöhten Wasseraufnahme übersteigt die nun vorliegende Gesamtmasse die Ausgangsmasse des Probekörpers. Mit der Ausprägung des Rissbildes stabilisiert sich der Massenverlauf, sodass bei den fortschreitenden Frost-Tau-Zyklen keine nennenswerten Massenänderungen mehr zu verzeichnen sind. Alle untersuchten Gemischkombinationen weisen zum Prüfzeitpunkt nach 28 Tagen maximal 101% ihrer Ausgangsmasse auf.

In den Bildern 6.62 und 6.63 sind die Spannungs-Dehnungs-Linien der Druckfestigkeitsprüfungen der Probenserie 4 nach 49 Tagen mit 12 Frost-Tau-Wechseln dargestellt. Die Festigkeitsunterschiede resultieren aus unterschiedlichen Gefügauflockerungen infolge der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung. Die Gefügestabilität ist vom Verdichtungsgrad und besonders vom Kalk-Hüttensand-Gehalt abhängig, wie die in Tabelle 6.15 angegebenen E-Moduln verdeutlichen.

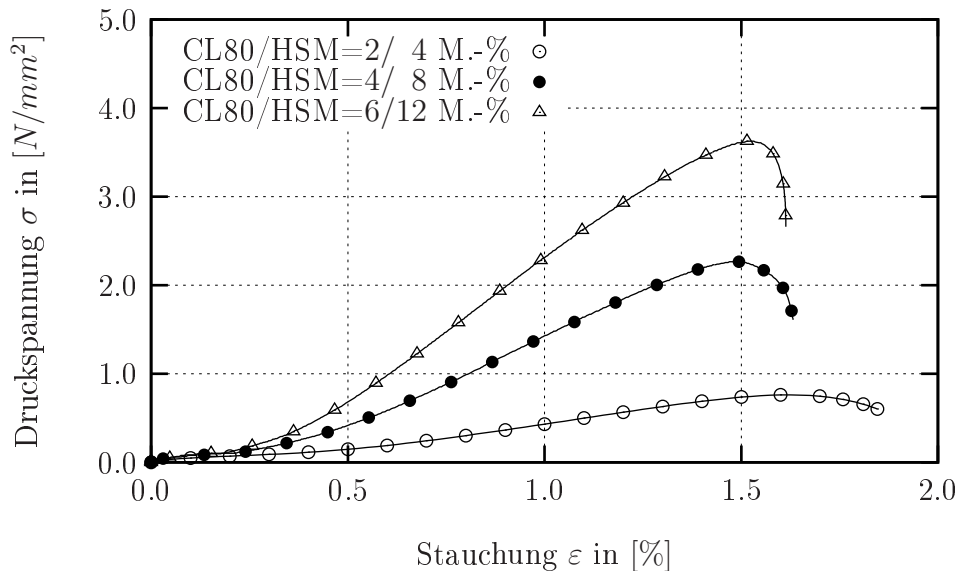


Bild 6.62: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 49 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 4 - Frost-Tau-Wechsel nach 28 Tagen)

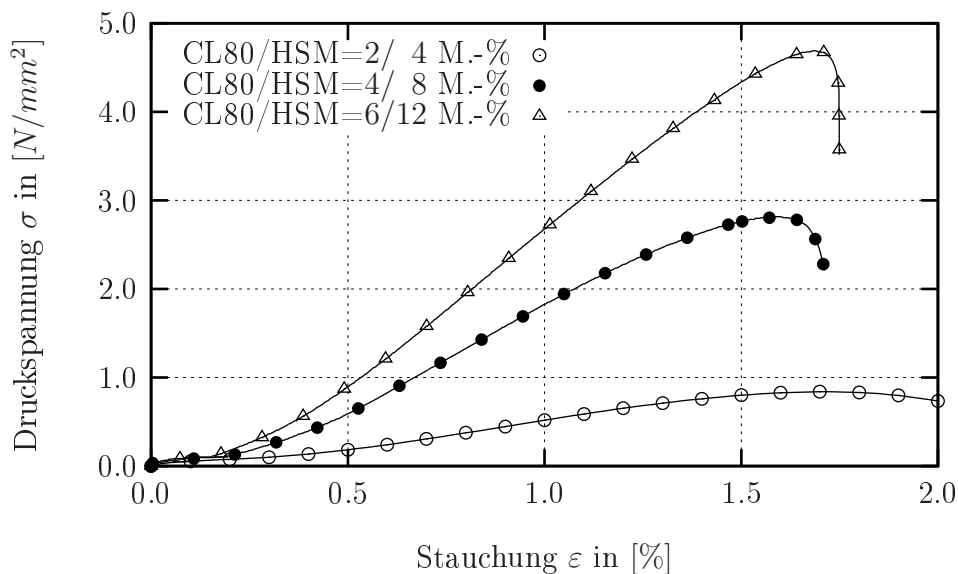


Bild 6.63: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 49 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 4 - Frost-Tau-Wechsel nach 28 Tagen)

Die, im Vergleich zur Serie 3, um drei Wochen längere Reaktionsphase des Erdstoff-Hüttensand-Kalk-Gemisches wirkt sich günstig auf die Klimabeständigkeit aus. Durch den späteren Zeitpunkt der ersten Frostbelastung können Festigkeitssteigerungen um bis

zu 40% erzielt werden. In Bild 6.64 sind die prozentualen Massenverläufe einer Probereihe der Gemischkombination CL80/HSM=4/8% mit einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm}/\text{m}^3$ während der Lagerung im Klimaschrank dargestellt.

Tabelle 6.15: E-Moduln in Abhängigkeit der Gemischkombination

Gemisch CL80/HSM in [M – %]	$W = 0,6 \text{ MNm}/\text{m}^3$ gemittelter E-Modul \bar{E} in [N/mm^2]	$W = 1,2 \text{ MNm}/\text{m}^3$ gemittelter E-Modul \bar{E} in [N/mm^2]	E-Modul Differenz ΔE in [N/mm^2]
2/ 4	62,24	68,06	5,82
4/ 8	227,50	243,62	16,12
6/12	336,29	358,86	22,57

Der Massenverlauf in Bild 6.64 verdeutlicht die erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen klimatische Beanspruchungen. Bereits mit dem ersten Frost-Tau-Wechsel wird eine relative Massekonstanz festgestellt, da sich ein gleichmäßiges, sich nicht veränderndes Rissbild ausgeprägt hatte.

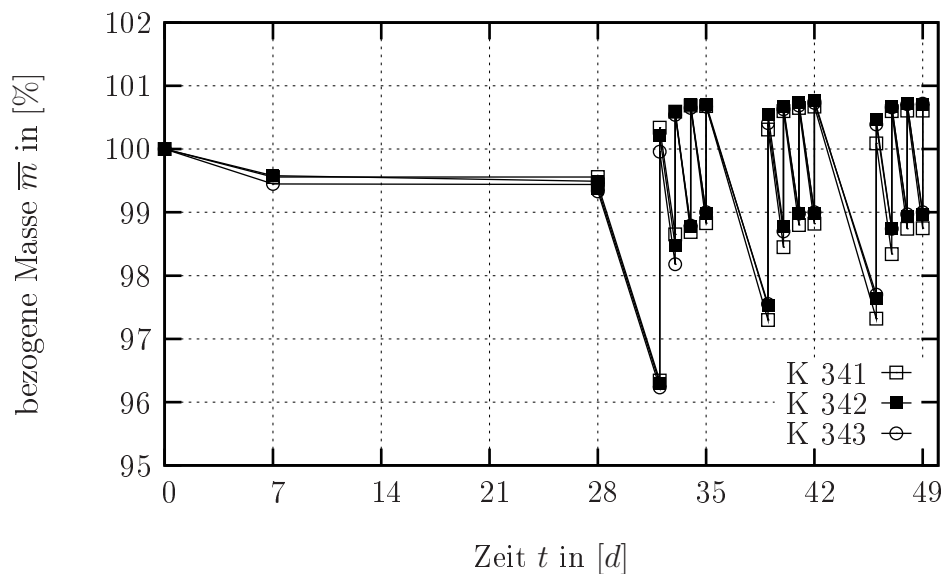


Bild 6.64: Prozentualer Massenverlauf der Probekörper K341 – K343 während der Lagerung im Klimaschrank (Frost-Tau-Wechsel)

Nach Beendigung der Lagerung und erfolgter einaxialer Druckfestigkeitsprüfung wurde der Wassergehalt der Probekörper durch Ofentrocknung bei 105°C bestimmt. In Tabelle 6.16 ist exemplarisch der Wassergehalt für den Probekörper K341 dargestellt (vgl. hierzu die Bilder 6.64 und 6.65).

Tabelle 6.16: Wassergehalt w und Trockenmasse m_d des Probekörpers K341 vor und nach der Lagerung im Klimaschrank

Zeitpunkt t in [d]	Masse m in [g]	Wassergehalt w in [%]	Trockenmasse m_d in [g]
1/24	638,60	29,58	492,82
49	642,51	28,56	499,77

Obwohl die Feuchtmasse m nach 49 Tagen größer als zum Herstellungszeitpunkt ist, verringert sich der Wassergehalt um 1%. Ein Vergleich der Trockenmasse m_d ergibt eine Differenz von 7 Gramm. Diese Zunahme ist auf Bindung des Wassers innerhalb der Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Struktur zurückzuführen. Die entstanden, festen Verbindungen geben das gebundenen Wasser nicht bei der Trocknungstemperatur von 105°C frei. Um auf die Art der Verbindungen zu schließen, wurden daher zusätzlich Thermoanalysen von Probekörpern durchgeführt.

In Bild 6.65 sind die Probekörper der Serie 4 für die untersuchten Gemischkombinationen mit einer äquivalenten Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ nach den Frost-Tau-Beanspruchungen dargestellt. Die Klimabeständigkeit wird hier visuell deutlich. Die frostempfindliche Gemischkombination mit 2%-igem Kalkanteil weist die stärksten Abplatzungen und Zerstörungen der Oberfläche auf. Mit zunehmenden Bindemittelanteil nehmen diese oberflächigen Schädigungen sichtbar ab.



Bild 6.65: Probekörper der Serie 4 nach 12 Frost-Tau-Wechseln

Im folgenden Bild 6.66 sind die Mantelflächen von zwei Probekörpern der Gemischkombination CL80/HSM=4/8% mit einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ der Serie 3 und 4 dargestellt. In Bild 6.66 (links), mit einer ersten Frostbelastung nach 7 Tagen, zeichnet sich deutlich das porige Gefüge ab. Mit geringen Kalkanlagerungen versetzte Haarrisse verlaufen an den äußeren Partikelrändern. Tritt die erste Frostbelastung zu einem späteren Zeitpunkt auf, erhöht sich die Klimabeständigkeit durch die fortschreitende Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Reaktion deutlich. In Bild 6.66 (rechts) verteilen sich die Haarrisse feinstrukturiert und netzartig auf der Oberfläche. Aufgrund der Vielzahl der durch Kalkverbindungen verkitteten Porenräume treten keine so stark ausgeprägten Risse, wie bei frühzeitigen Frostbelastungen auf.

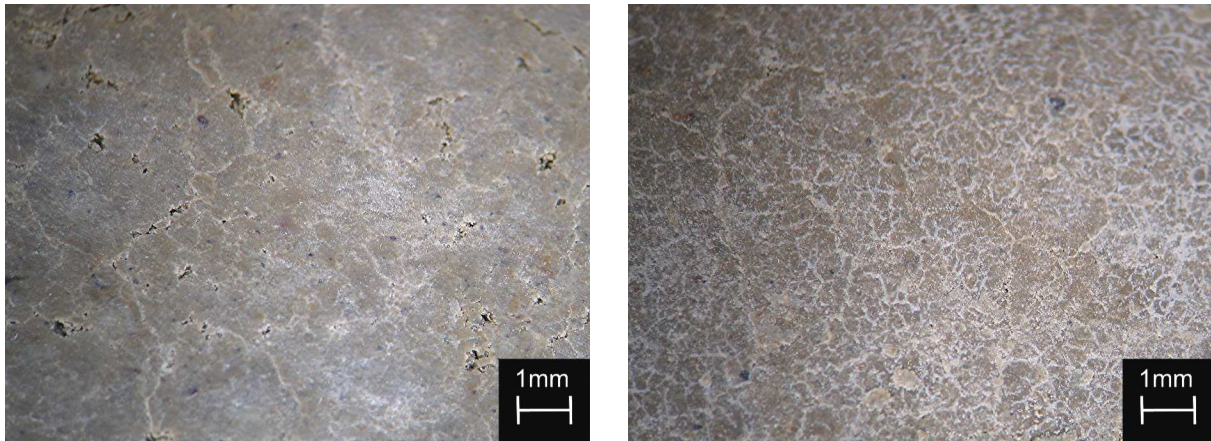


Bild 6.66: Probenoberfläche der Gemischkombination CL80/HSM=4/8% mit Frostbelastung nach 7 Tagen (links) und mit Frostbelastung nach 28 Tagen (rechts) und einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$

In Bild 6.67 ist der Einfluss der Verdichtungsarbeit auf das Porengefüge der Probekörper dargestellt. In Bild 6.67 (links) sind die gering deformierten Partikel der Krümelstruktur des Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Gemisches zu erkennen. Größere Porenräume an den Kontaktstellen von mehreren Partikeln untereinander können mit der Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ nicht vermieden werden. Diese Porenräume begünstigen die Einlagerung von Wasser, das bei Frostbelastung verbundzerstörende Hebungen verursachen kann.

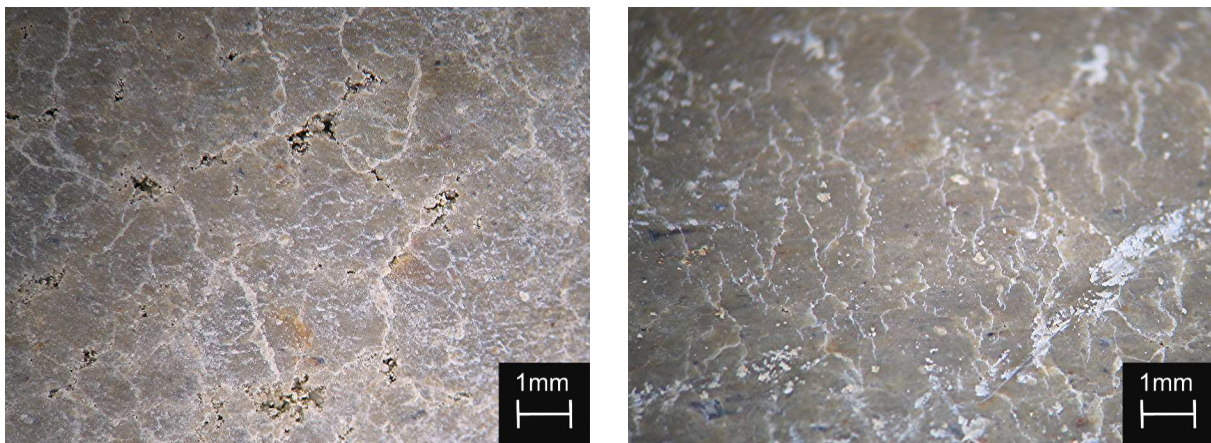


Bild 6.67: Probenoberfläche der Gemischkombination CL80/HSM=6/12% mit einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (links) und mit einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (rechts) bei Frostbelastung nach 7 Tagen

In Bild 6.67 (rechts) werden aufgrund der Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ die Partikel stärker deformiert, sodass eine Schichtung zu erkennen ist. Die reduzierten Porenräume in den Zwickeln sind durch Kalkverbindungen fast vollständig geschlossen. Die Festigkeitsdifferenz zwischen den Verdichtungsarbeiten fällt mit $0,3 \text{ N/mm}^2$ für die dargestellten Proben der Serie 3 infolge der frühen Frostbelastung nach 7 Tagen sehr gering aus. Wird die erste Frostbelastung nach 28 Tagen gewählt (vgl. Serie 4), steigt die Festigkeitsdifferenz für die in Bild 6.67 dargestellte Gemischkombination auf 1 N/mm^2 .

6.3.2.4 Einaxiale Druckfestigkeiten der Serie 5

Bodenbehandlungsmaßnahmen mit Kalk werden überwiegend bei feinkörnigen Erdstoffen ausgeführt. Kennzeichnend für diese Erdstoffe sind geringe Wasserdurchlässigkeiten. Werden Bodenbehandlungen während einer Schlechtwetterphase ausgeführt und ist die Querneigung bzw. die Ebenheit der behandelten Schicht nicht optimal ausgebildet, so kann es zu stehendem Wasser auf der behandelten Schicht kommen. Um diesen Einfluss zu erfassen, wurden die Probekörper der Serie 5 partiell unter Wasser gelagert, wie in Bild 6.68 dargestellt ist.



Bild 6.68: Draufsicht auf die Probekörper während der Lagerung in Wassertonnen

Nachdem die, für alle Serien identische, siebentätige Lagerung bei 40°C abgeschlossen war, wurden die Probekörper in wassergefüllten, luftdicht verschließbaren Gefäßen gelagert. Mit zunehmender Dauer bildete sich ein oberflächiger Film auf den Probekörpern aus. In Bild 6.69 ist zu erkennen, dass die Intensität dieser Schicht von der Gemischkombination abhängig ist. Je höher der zugegebene Kalkanteil ist, desto ausgeprägter und heller wird diese oberflächige Anlagerung.



Bild 6.69: Farbliche Veränderungen der Probekörper in Abhängigkeit des Kalkgehaltes

Die Druckfestigkeitsprüfungen wurden analog zu den Serien 1-4 ausgeführt. In den Bildern 6.70 und 6.71 sind die einaxialen Druckfestigkeiten nach 28 Tagen dargestellt. Die

Bruchspannungen und Bruchstauchungen weisen für gleiche Gemischkombinationen nahezu identische Werte auf. Die Festigkeiten korrelieren bei dieser Behandlung nur mit dem Bindemittelanteil und nicht mit der Verdichtungsarbeit. Die E-Moduln weisen für die Serie 5 die Maximalwerte auf. Trotz Unterwasserlagerung erhöhen sich die durchschnittlichen Wassergehalte zum Prüfzeitpunkt nur um 0,5% gegenüber den Wassergehalten zum Herstellungszeitpunkt der Probekörper eine Stunde nach Kalkzugabe. Werden wiederum die Trockenmassen vor und nach der Lagerung betrachtet, so kann aufgrund der Trockenmassezunahme darauf geschlossen werden, dass das eingelagerte Wasser an der Entstehung neuer Verbindungen beteiligt ist, die erst bei höheren Temperaturen als 105°C aufgespalten werden können.

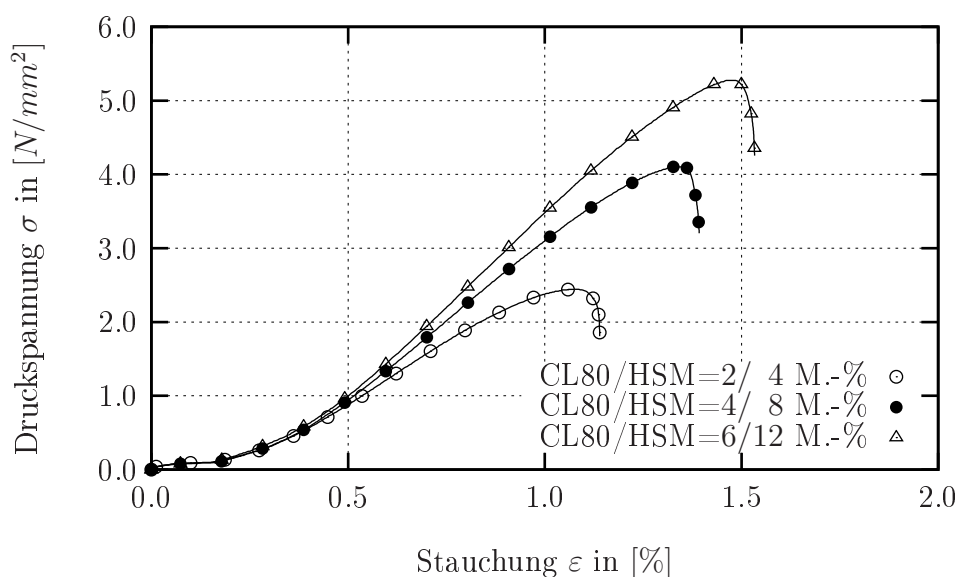


Bild 6.70: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 5 - Wasserlagerung)

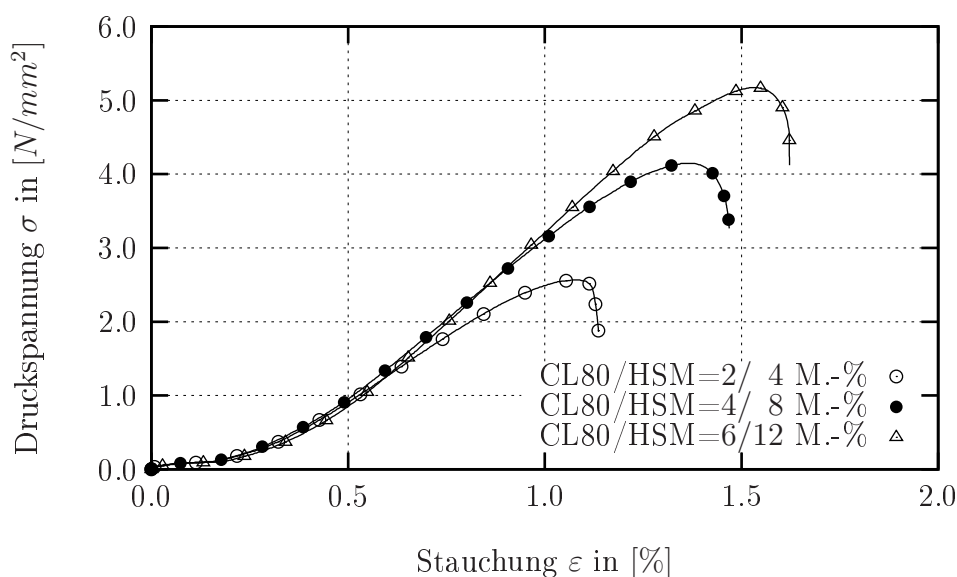


Bild 6.71: Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 5 - Wasserlagerung)

Im Bild 6.72 sind mikroskopische Aufnahmen der Oberflächen der unterschiedlich verdichteten Probekörper nach Beendigung der Wasserlagerung dargestellt.

Die in Bild 6.72 (links) abgebildete Oberfläche weist aufgrund der geringeren Verdichtung keine ausgeprägte Schichtung auf. Infolge der nur schwach deformierten Gemischpartikel ist eine größere Porosität vorhanden. An diesen Haufwerksporen lagern sich verstärkt Kalkverbindungen ab. Der intensiver verdichtete Probekörper in Bild 6.72 (rechts) ist durch flächige Kalkverbindungen gekennzeichnet. Diese, während der Wasserlagerung entstandene Schicht aus Kalkverbindungen, ist aufgrund von Schwindvorgängen bei oberflächiger Austrocknung gerissen. Das Rissbild folgt der Schichtung des Probekörpers.

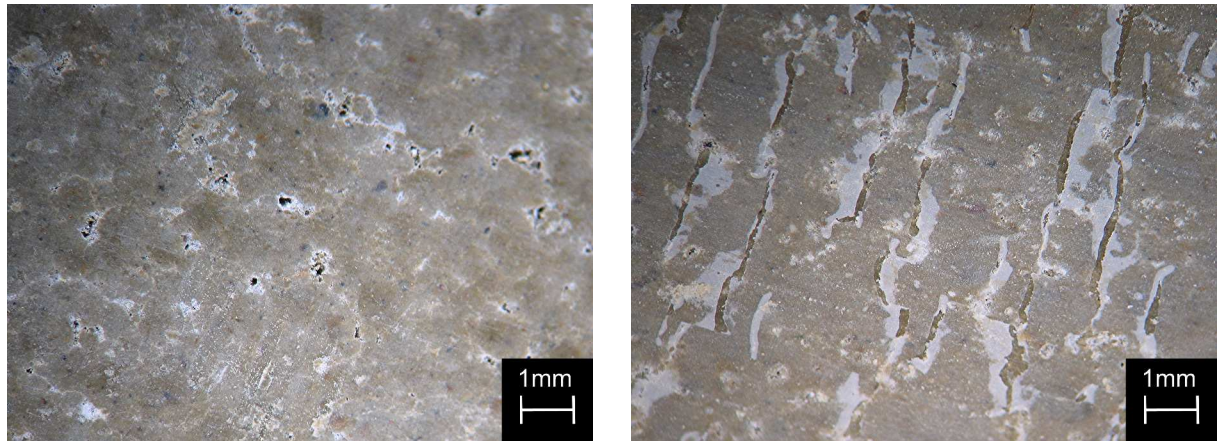


Bild 6.72: Probenoberfläche der Gemischkombination CL80/HSM=4/8% bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (links) und bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (rechts) (Wasserlagerung)

6.3.3 Konsistenzgrenzen

Die Zugabe von Hüttensandmehl in Kombination mit Kalk bewirkt eine Veränderung der Zustandsgrenzen des Erdstoffs. Um den Einfluss dieser Komponenten zu erfassen, wurden separate Bestimmungen der Konsistenzgrenzen für

- den Erdstoff,
- die Erdstoff-Kalk-Gemische,
- die Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemische sowie
- die Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Gemische

durchgeführt. Hierbei entsprechen die Masseanteile der einzelnen Komponenten den Anteilen der verwendeten Gemischkombinationen. Die Versuche wurden nach *DIN 18122/1* mit den Ergänzungen der *TP BF-StB, Teil B 11.5* für die Erdstoffgemische durchgeführt. Da der Erdstoff keine Kornfraktion $d > 0,4 \text{ mm}$ enthält, entfällt die Abtrennung von größeren Korndurchmessern durch Trockensiebung. Im Folgenden wurde der Wassergehalt w des Erdstoffs auf die Fließgrenze w_L eingestellt. Hierzu wurde einer definierten Erdstoffmasse mit bekanntem Wassergehalt eine kalkulierte Wassermenge m_w zugegeben und

durchmischt. Dieser Erdstoff wurde mindestens 24 Stunden in luftdicht abgeschlossenen Gefäßen gelagert, bevor Hüttensandmehl oder Kalk zugegeben wurde. Die Vermengung dieser Bestandteile erfolgte auf die in Abschnitt 6.1.1 beschriebene Weise durch einen manuellen und einen maschinellen Mischvorgang. Diese Erdstoffgemische wurden daraufhin nochmals 24 Stunden in den luftdicht abgeschlossenen Gefäßen gelagert. Die *Atterbergschen Grenzen* wurden daraufhin nach *DIN 18122 - Teil 1* ermittelt.

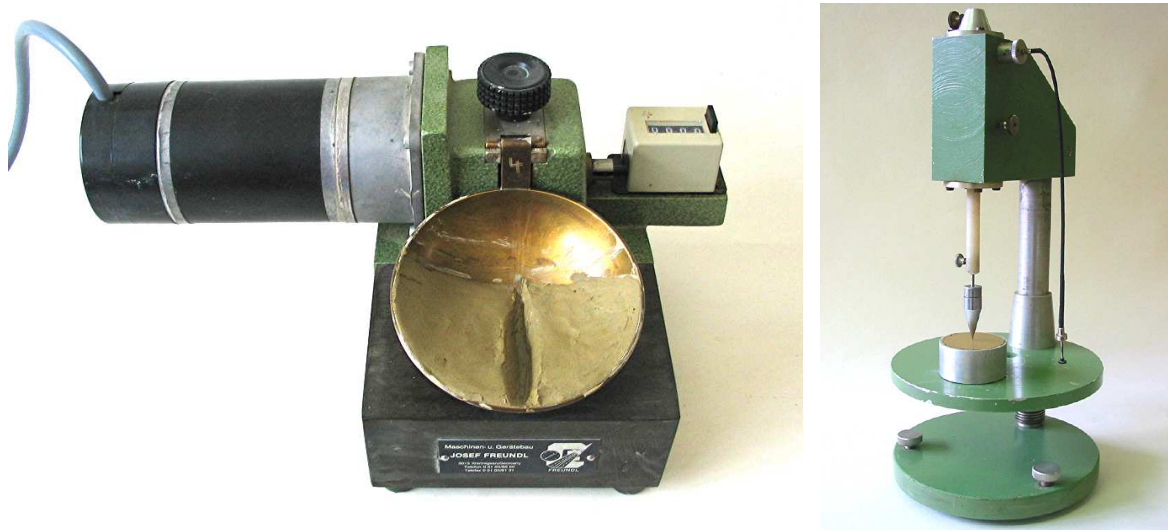


Bild 6.73: Fließgrenzengerät nach *Casagrande* (links) und Kegelgerät (rechts)

Die Bestimmung der Zustandsgrenzen für die Erdstoff-Kalk-Gemische und besonders für die Erdstoff-Kalk-Hüttensandmehl-Gemische erwies sich jedoch aufgrund der Strukturänderung des Erdstoffs als schwierig. Neben dem in Bild 6.73 (links) dargestellten Fließgrenzengerät wurde daher zusätzlich das im Bild 6.73 (rechts) dargestellte Kegelgerät zur Überprüfung der Fließgrenze w_L eingesetzt. Die Fließgrenze lässt sich hierbei über die Eindringtiefe des Kegels nach der Mehrpunktmethode ermitteln [57].

In Bild 6.74 sind übliche Veränderungen der *Atterbergschen Grenzen* bei Bodenbehandlungen mit Kalk dargestellt. Dabei wird die Ausrollgrenze w_P erhöht, die Plastizitätszahl I_P sowie die Fließgrenze w_L bei Tonen verringert und bei Schluffen erhöht [7].

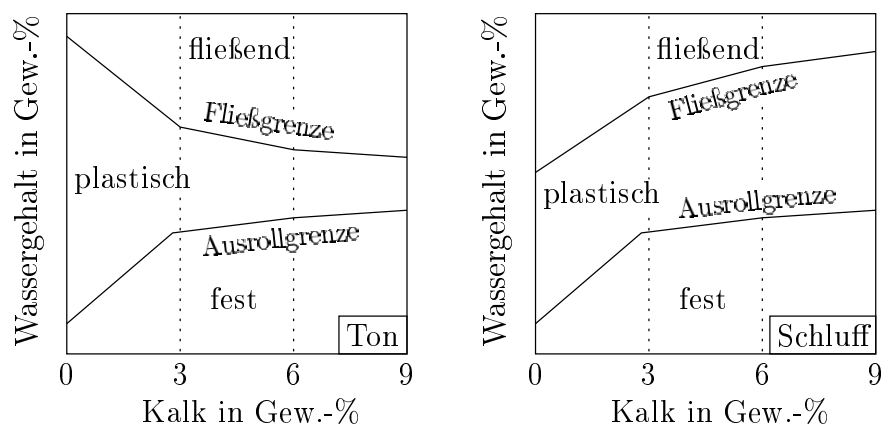


Bild 6.74: Veränderung der Plastizität in Ton- und Schluffböden bei der Zugabe von Kalk [7]

In den Bildern 6.75 und 6.76 sind die Versuchsergebnisse der Plastizitätsbestimmung für den Erdstoff und für die untersuchten Gemischkombinationen dargestellt.

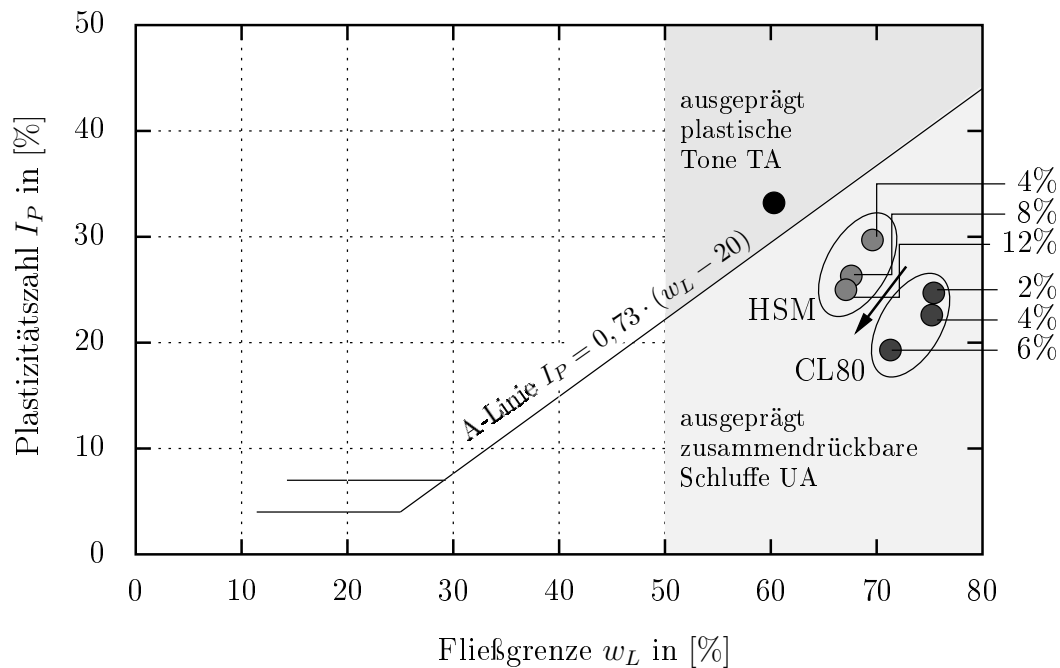


Bild 6.75: Plastizitätsdiagramm nach *DIN 18196* für Erdstoff-Kalk-Gemische und Erdstoff-HSM-Gemische

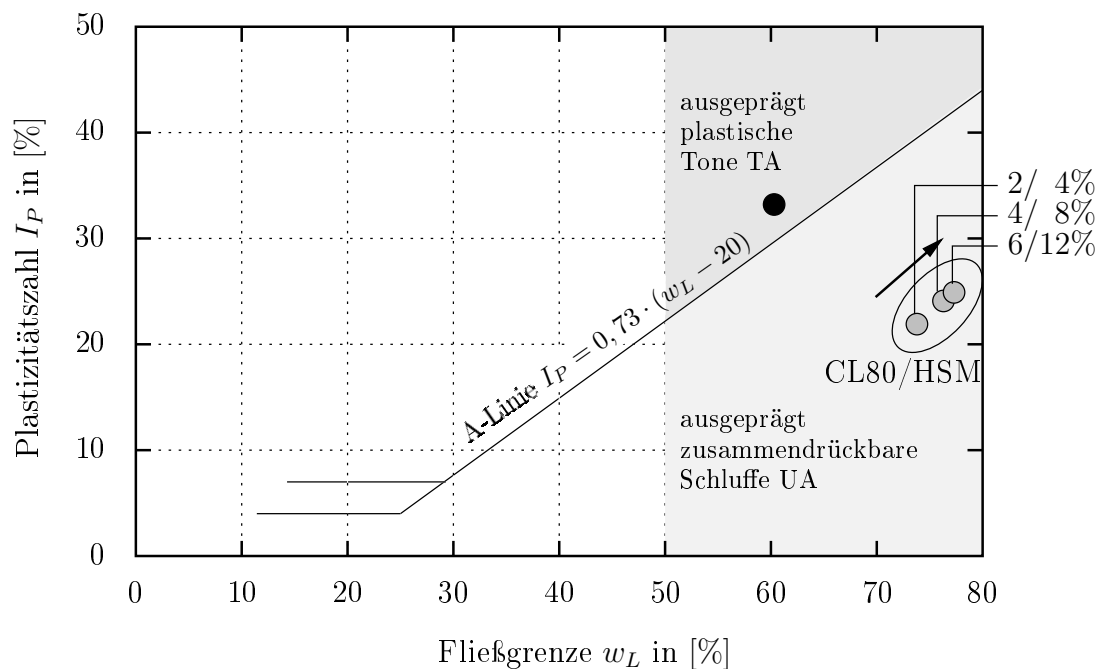


Bild 6.76: Plastizitätsdiagramm nach *DIN 18196* für die Erdstoff-HSM-Kalk-Gemische

Aus Bild 6.75 wird ersichtlich, dass durch die Zugabe von Kalk die plastischen Eigenschaften des Erdstoffs verändert wurden. Mit zunehmendem Kalkanteil verringerte sich sowohl die Plastizitätszahl als auch die Fließgrenze, sodass der Erdstoff entsprechend Bild 6.74

als Ton klassifiziert werden kann. Auch die Zugabe von Hüttensandmehl zum Erdstoff beeinflusst die plastischen Eigenschaften auf ähnliche Weise.

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass durch das Einmischen des nichtbindigen Hüttensandes, allein aufgrund der veränderten Korngrößenzusammensetzung, die Plastizität, also die Bindigkeit dieses Gemisches abnimmt, wie die Tabelle 6.17 belegt.

Tabelle 6.17: Plastizitätsänderung infolge Einmischen von Hüttensandmehl zum Erdstoff

	Hüttensandmehlanteil an der Erdstofftrockenmasse in [%]	
	0	12
Plastizitätszahl I_P in [%]	33,2	25,0
Klassifizierung typischer Erdstoff	hochplastisch fetter Ton	gut plastisch Lehm, magerer Ton

Mit steigendem Hüttensandmehlanteil wurde somit ein quasi schluffiges Gemisch erzeugt. In den Bildern 6.76 und 6.77 wird dieser Sachverhalt bestätigt, da sich die Fließgrenze des Erdstoff-Hüttensandmehl-Gemisches mit steigendem Kalkanteil erhöht und somit entsprechend Bild 6.74 als Schluff eingestuft werden muss.

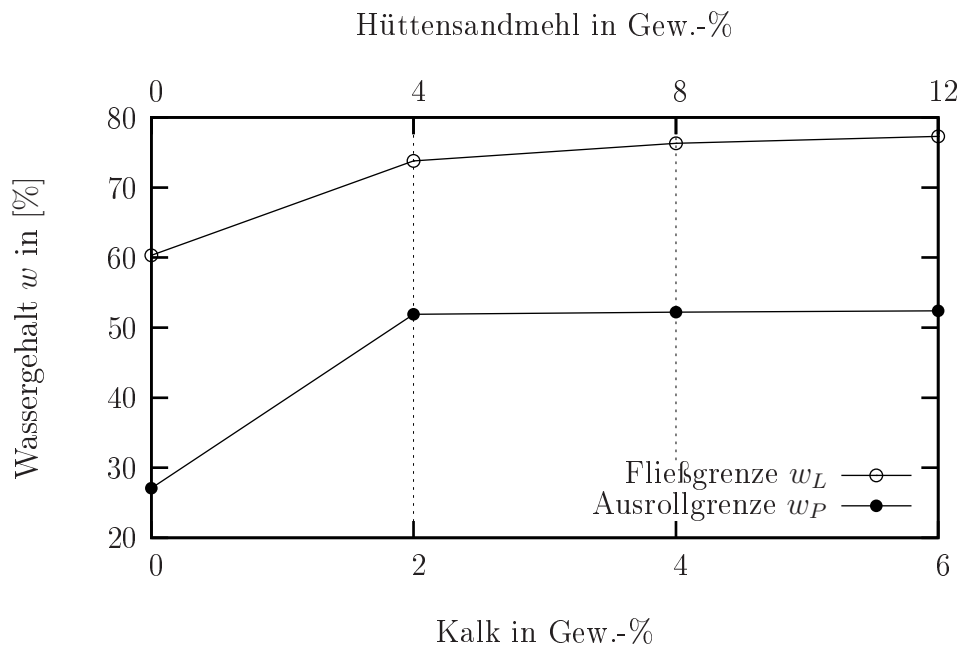


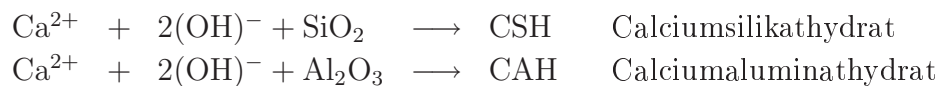
Bild 6.77: Ausrollgrenze und Fließgrenze des Erdstoff-Kalk-Hüttensandmehl-Gemisches

Kapitel 7

Auswertung

Die Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften von feinkörnigen Erdstoffen wurde in den durchgeführten Laborversuchen nachgewiesen. Insbesondere die Zunahme der Widerstandsfähigkeit gegenüber klimatischen Beanspruchungen und die Erhöhung der Tragfähigkeit stellten hierbei das Hauptkriterium dar. Überleitend von den bodenmechanischen Kenngrößen werden in diesem Kapitel die Wirkungsmechanismen für die Verbesserung dieser bautechnisch relevanten Eigenschaften untersucht und diskutiert.

In den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2.1 wurde bereits beschrieben, dass mit steigendem pH-Wert in der Porenlösung eine verstärkte Dissoziation von Silanol- und Aluminolgruppen einsetzt. Bei dem sich durch die Kalkzugabe stark basisch einstellendem Milieu werden SiO_2 und Al_2O_3 aus den Tonmineralen gelöst. Die Lösungsprodukte füllen gelartig den Porenraum und können mit den Calcium-Ionen zu festigkeitssteigernden Hydratphasen reagieren. Nachfolgend sind diese puzzolanen Reaktionen vereinfacht dargestellt.



Die hierdurch hervorgerufene hydraulische Erhärtung entwickelt sich allmählich und ist erst nach mehreren Tagen messbar, kann jedoch auch noch Jahre nach der Kalkbehandlung andauern [60].

In den durchgeführten Versuchen konnten keine wesentlichen Festigkeitsunterschiede zwischen den Prüfzeitpunkten 28 Tage und 56 Tage festgestellt werden, sodass auf eine sich schnell entwickelnde Erhärtung geschlossen werden kann. Als Ursache hierfür können intensivere Reaktionen der Hydraulefaktoren und Kalkanteile des latent-hydraulisch wirkenden Hüttensandmehls angesehen werden.

Hüttensandhaltige Zemente kommen auch in Kalk-Zement-Mischbindern zum Einsatz. Die sofortige Ausbildung von Hydratationsprodukten ist hierbei jedoch auf die Portlandzementklinker $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ und $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ des Zementes zurückzuführen. Ob das in den Versuchen eingesetzte Hüttensandmehl ähnliche, schnell erhärtende Hydratationsphase mit dem Kalk bildet, wurde zusätzlich an definierten Baustoffzusammensetzungen untersucht, wie nachfolgend dargestellt wird.

7.1 Definierte Baustoffrezepturen

Zum Nachweis der hydraulischen Verfestigung zwischen dem Baukalk CL80 und dem Hüttensandmehl sowie der puzzolanischen Reaktion mit dem Erdstoff wurden die Wirkungsweisen der einzelnen Komponenten an Mörtelprismen untersucht. Hierzu wurden die in Tabelle 7.1 angegebenen Baustoffrezepturen verwendet.

Tabelle 7.1: Zusammensetzung der Prüfkörper

Bezeichnung Rezeptur	Hüttensand m in $[g]$	Tonmehl m in $[g]$	CL80 m in $[g]$	Normsand m in $[g]$	Wasser m in $[g]$
0	600	—	300	—	300
1	600	—	300	1350	450
2	600	—	300	1350	380
3	720	—	180	1350	450
1a	300	300	300	1350	500
2a	300	300	300	1350	400
3a	360	360	180	1350	500

Die Probekörper wurden in Anlehnung an die *DIN EN 196, Teil 1* [8] in Dreifachprismenformen mit den Einzelabmessungen $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ hergestellt. Die Lagerung dieser Prismen ist entsprechend den Lagerungsbedingungen des verfestigten Erdstoffs in zwei klimatischen Abschnitten durchgeführt worden. Direkt nach der Prismenherstellung in der Dreifachprismenform, wurde diese an der Oberseite luftdicht verpackt und bei 40°C und 98% relativer Luftfeuchte für 7 Tage in einem programmierbaren Klimaschrank deponiert. Anschließend wurde die Lagerung der Prismenform mit freier Oberseite in einem luftdicht verschließbaren Gefäß bei einer Raumtemperatur von 20°C fortgesetzt. Die Prismenformen lagerten hierin auf Abstandhaltern, sodass der Gefäßboden mit Wasser gefüllt werden konnte, ohne das die Prismen direkt mit dem Wasser in Kontakt kamen. Diese luftdichte Feuchtlagerung soll einerseits die Carbonatisierungsreaktion hemmen und andererseits die Prismen vor Austrocknung schützen. Nach einer Gesamtlagerungsdauer von 28 Tagen wurden die Druckfestigkeiten der Prismen entsprechend *DIN EN 196* ermittelt. In Bild 7.1 ist die Prüfung der Prismen dargestellt.

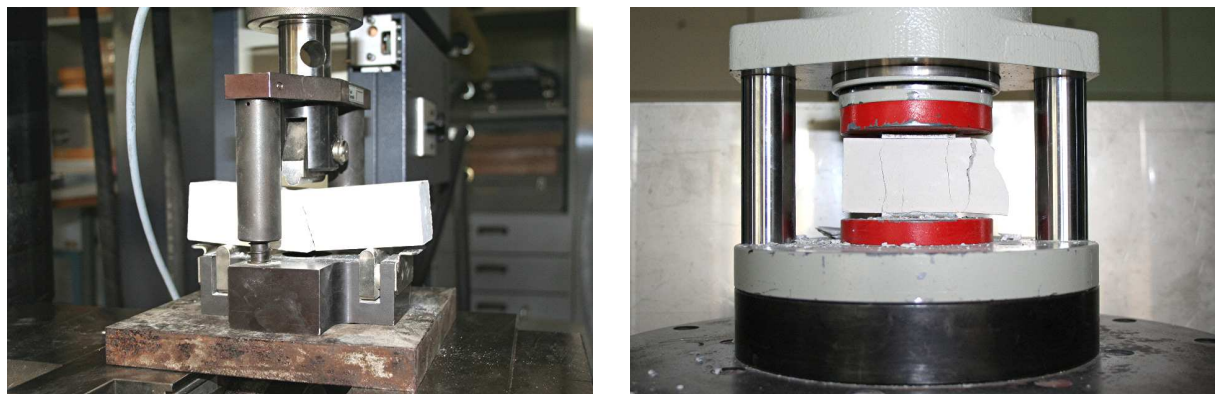


Bild 7.1: Prüfung der Prismen im Biegezugversuch (links) und im Druckversuch (rechts)

Während des Prüfvorganges zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit brechen die Prismen in zwei Hälften, die anschließend auf Druckfestigkeit geprüft wurden. In Tabelle 7.2 sind die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen dargestellt.

Tabelle 7.2: Biegezug- und Druckfestigkeiten der Prüfprismen nach 28 Tagen

Bezeichnung Rezeptur	Biegezugversuch		Druckversuch	
	Festigkeit σ_u in $[N/mm^2]$	Maximalkraft $\max F$ in $[kN]$	Festigkeit σ_u in $[N/mm^2]$	Maximalkraft $\max F$ in $[kN]$
0	3,04	1,46	16,51	26,41
1	4,96	2,41	25,30	40,48
2	4,96	2,42	23,59	37,74
3	5,93	2,70	25,75	41,19
1a	3,49	1,49	13,01	20,82
2a	3,41	1,45	19,58	31,34
3a	3,84	1,64	18,95	30,32

Bereits die Rezeptur 0, bestehend aus dem latent-hydraulisch wirkenden Hüttensandmehl und dem Bindemittel Kalk, weist 28-Tage-Festigkeiten auf, die in dieser Größenordnung nicht ausschließlich durch Carbonatisierung, sondern vielmehr nur durch verfestigte Calcium-Silikat-Hydrat-Verbindungen hervorgerufen werden können. Somit bestätigt sich die Reaktionsfähigkeit zwischen den Komponenten HSM und CL80 sowie die Fähigkeit dieser, miteinander zu CSH-Phasen reagieren zu können.

Die maximalen Druckfestigkeiten σ_u treten bei den Rezepturen 1 bis 3 auf. Die Steigerung der Festigkeiten liegt in der Einbettung und Verkittung des zugegebenen Normsandes in die Hüttensand-Kalk-Matrix begründet. Bei Zugabe von Tonmehl in den Rezepturen 1a bis 3a verringern sich die Festigkeiten. Bei der Rezeptur 3a, mit einem vergleichbaren 2:1-Verhältnis von HSM zu CL80, treten Festigkeitseinbußen von etwa 25 Prozent auf. Auch hier sind CSH-Verbindungen an der Verfestigung beteiligt, jedoch findet ein Teil der Reaktionen an den Oberflächen der Tonminerale statt, die wesentlich langsamer verlaufen als die Hüttensand-Kalk-Reaktionen.

Ein wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit hat weiterhin die Zugabemenge des Anmachwassers, wie die Rezepturen 1a und 2a verdeutlichen. Da durch den Kalk nur eine begrenzte Menge an Wasser gebunden werden kann, führt ein Überschuss an Wasser zu Konsistenzveränderungen des Tonmehls. Sind quellfähige Tonminerale in der Rezeptur enthalten, kommt es durch interkristalline Quellungen zu Schichtaufweitungen, die die Scherfestigkeit des Tones vermindern, wodurch die Gesamtfestigkeit stark herabgesetzt wird. Die Rezepturen 2a und 3a verdeutlichen, dass der Kalkanteil nur bis zu einer bestimmten Menge zur Festigkeitsteigerung beiträgt. Diese Eigenschaft ist auch aus der Bodenverfestigung mit Kalk bekannt, da Zugabemengen größer als 8 M. – % keine wesentlichen Festigkeitszuwächse mehr liefern.

Zum Vergleich der Reaktionsmechanismen wurden thermogravimetrische Untersuchungen an den Rezepturen 0, 3 und 3a durchgeführt, die in Abschnitt 7.2 beschrieben sind.

Mit denen in Tabelle 7.2 dargestellten Festigkeiten lässt sich schlussfolgern, dass die im Hüttensandmehl enthaltenen Hydraulefaktoren mit dem Kalkhydrat ein hydraulisch wirkendes Bindemittel ergeben. Die Erhärtung der Prismen basiert somit einerseits auf der

Bildung von festigkeitssteigernden CSH-Phasen und andererseits auf der Carbonatisierung des Kalkes. Aufgrund der Feuchtlagerung der Prismen und des vorhandenen Kohlendioxids der eingeschlossenen Luft in den Lagerungsgefäßen wird die Carbonatisierung nach Gleichung 4.3 ausgelöst.

Um die Calciumcarbonatbildung nachzuweisen, wurde sowohl die Prismenoberfläche als auch das Prismeninnere mit verdünnter Salzsäure benetzt. Dieser Säureangriff bewirkt nach Gleichung 7.1 eine Zersetzung des Calciumcarbonates in Calciumchlorid und Kohlensäure, wobei die Säure spontan in Wasser und entweichendes Kohlendioxid zerfällt, was durch ein starkes Aufbrausen sichtbar wird.



Der Carbonatnachweis ist in Bild 7.2 für die Prismenoberseite (links) und das Prismeninnere (rechts) dargestellt.

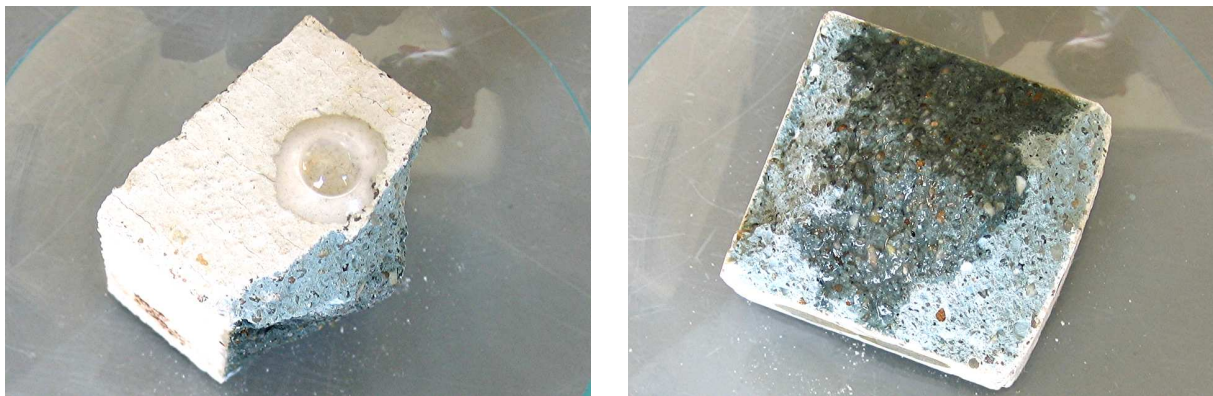


Bild 7.2: Nachweis der Carbonatisierung durch Zugabe von Salzsäure; auf der Oberfläche des Prismas (links) und im Inneren des Prismas (rechts)

Im Wesentlichen konnte die Carbonatisierung der Proben nur an den Oberflächen nachgewiesen werden, sodass die Festigkeit nahezu ausschließlich auf die Bildung von erhärtenden Calciumsilikathydraten zurückzuführen ist. Auch die Größenordnung der Druckfestigkeiten nach 28 Tagen bestätigen diese Aussage.

7.2 Thermische Analyse

7.2.1 Grundlagen

Bei der Thermischen Analyse [21] kommen Meßmethoden zum Einsatz, mit denen physikalische und chemische Eigenschaften einer Substanz oder eines Substanzgemisches als Funktion der Temperatur und Zeit gemessen werden, wobei die zu untersuchende Probe einem geregelten Temperaturprogramm unterworfen ist. Die Temperaturspanne umfasst im allgemeinen Temperaturen von Raumtemperatur bis zu 1500°C. Aufgrund von Zersetzungs- oder Oxidationsreaktionen werden innerhalb dieses Temperaturbereiches Masseänderungen hervorgerufen, die durch die Analysemethode der Thermogravimetrie

(TG) nach [22] untersucht werden. Die Masseänderungen werden durch Thermowaagen aufgezeichnet, deren schematischer Aufbau in Bild 7.3 dargestellt ist.

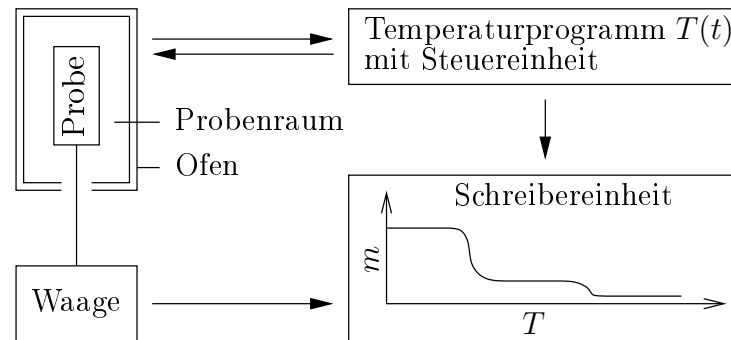


Bild 7.3: Schematische Darstellung einer Thermowaage-Einheit

Während des Versuchsablaufes wird die Ofentemperatur T mit einer konstanten Heizrate $\beta = dT/dt$ erhöht. Bei den folgend einsetzenden Zersetzungsreaktionen kann die Probe flüchtige Komponenten an die Umgebung abgeben oder aus ihr Reaktionspartner aufnehmen [30]. In Abhängigkeit der zu untersuchenden Probe wird die Messung entweder unter Normaldruck oder mit evakuiertem Probenraum durchgeführt. Die Atmosphäre im Probenraum stellt eine wichtige Einflussgröße auf die ablaufenden Reaktionen dar. Im allgemeinen werden inerte Spülgase (Stickstoff, Argon) oder oxidierende Spülgase (Sauerstoff, Luft) verwendet, die die Probe laminar umströmen oder ruhend umgeben, sofern diese mit dem Gas reagieren soll.

Um Rückschlüsse auf die Reaktionsenthalpie ΔH_R der stattfindenden Umwandlungen zu erhalten, findet die Differenzthermoanalyse (DTA) nach [23] Anwendung. Hierbei wird die Temperaturdifferenz zwischen der Probe und einer Vergleichsprobe gemessen.

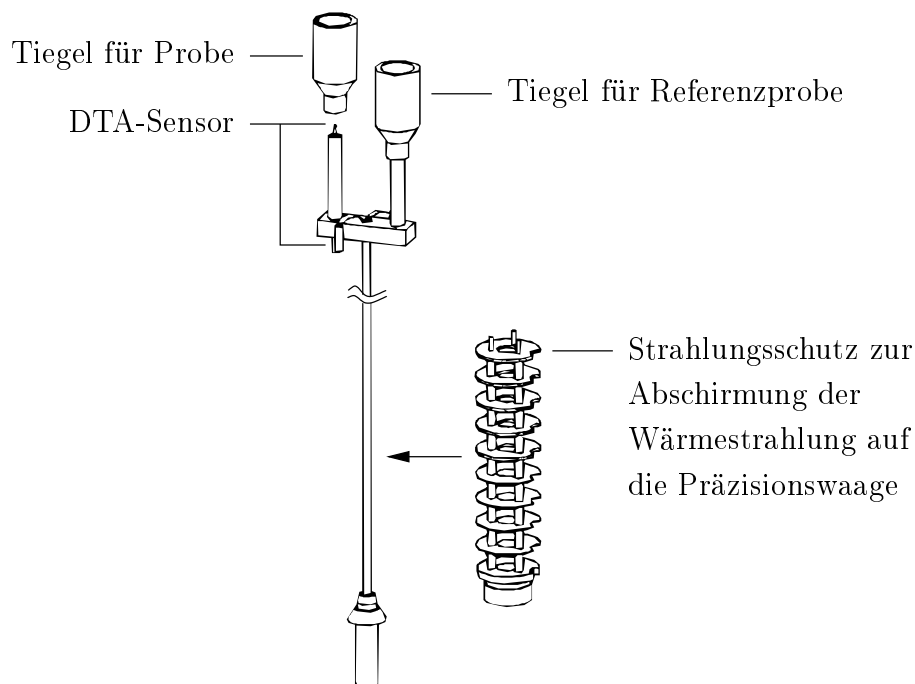


Bild 7.4: Probenträgersystem für kombinierte TG/DTA-Untersuchungen

Erhöht sich die Proben­temperatur im Vergleich zur Referenzprobe, so kann auf eine wärmefreisetzende exotherme Reaktion geschlossen werden. Im Fall einer endothermen Reaktionen vermindert sich die Proben­temperatur. Mit der DTA sind jedoch nur qualitative und keine quantitativen Aussagen möglich. In Bild 7.4 ist ein Probenträgersystem für kombinierte TG/DTA-Untersuchungen dargestellt. Das DTA-Signal wird über zwei in die Tiegel reichenden Sensoren an das Messsystem übertragen. Im allgemeinen besteht die Referenzprobe lediglich aus dem leeren Tiegel, sodass die Ofentemperatur in Höhe der Probe ermittelt werden kann.

7.2.2 Untersuchung der Einzelkomponenten

Zur Bestimmung der möglichen Verbindungen in den Gemischkombinationen des verfestigten Erdstoffs und der Baustoffprismen wurden die Ausgangsstoffe Ton, Hüttensandmehl und Kalk in einem ersten Schritt separat untersucht. Hierzu wurden simultane Thermanalysen (TG und DTA) mit dem thermischen Analysesystem NETZSCH STA 409EP durchgeführt. Die Atmosphäre im Probenraum entsprach hierbei Normaldruck. Als oxidierendes Umgebungsgas wurde Luft eingesetzt. Die Tiegel bestehen aus Aluminiumoxid Al_2O_3 , wobei der Referenztiegel nicht mit Material bestückt wird. Die Untersuchungen umfassten einen Temperaturbereich von 20°C bis 1000°C , bei einer Heizrate von 5 K/min des Ofens.

In Bild 7.5 sind die Versuchsergebnisse der thermischen Analyse des verwendeten Kalkhydrates dargestellt. Die thermogravimetrische Kurve zeigt eine zweistufige Masseabnahme. In der ersten Stufe, im Temperaturbereich zwischen 400°C und 480°C , wird das gebundene Wasser in Form von Gleichung 7.2 abgespalten. Hierbei handelt es sich um eine endotherme Reaktion, da zur Abspaltung Aktivierungsenergie aufgenommen werden muss.

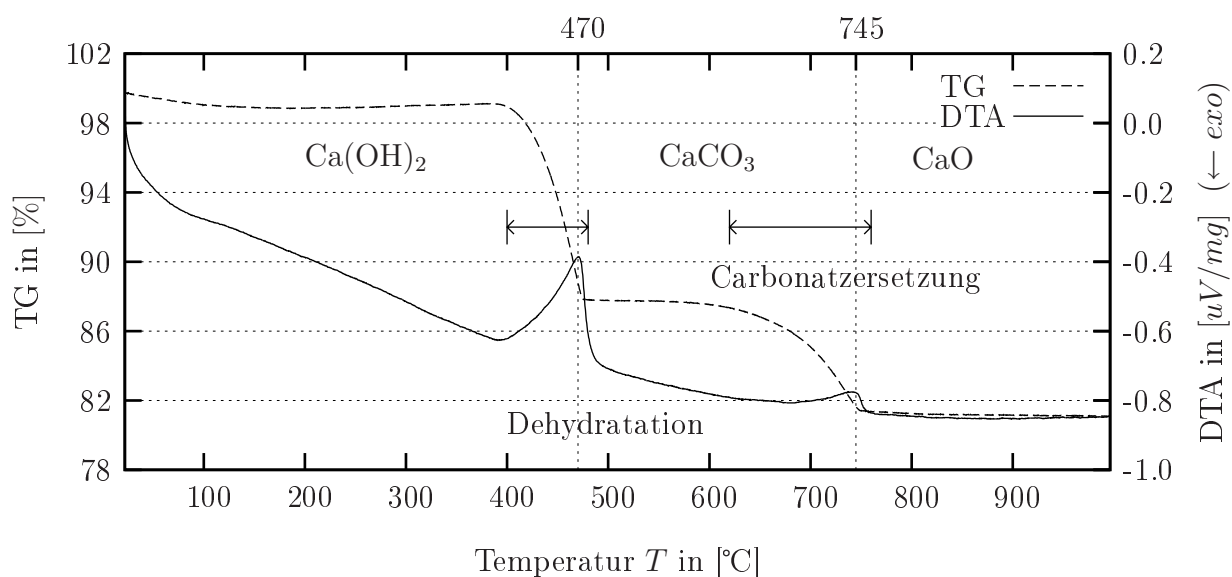


Bild 7.5: Thermische Analyse des Kalkhydrates CL80 mittels TG und DTA

In der DTA-Kurve wird dies durch einen nach oben gerichteten Peak sichtbar, da aufgrund der benötigten Reaktionsenergie die Proben­temperatur unterhalb der Referenzproben­temperatur liegt. Eine weitere Masseabnahme findet im Temperaturbereich zwischen 620°C und 760°C statt. Diese zweite Stufe der Masseänderung wird durch die Carbonatzersetzung nach Gleichung 7.3 hervorgerufen. Diese Reaktion verläuft ebenfalls endotherm, wie der DTA-Kurve entnommen werden kann.



In Bild 7.6 ist die thermische Analyse des Hüttensandmehls (HSM) dargestellt. Bis zu einer Temperatur von etwa 750°C verhält sich die Probe nahezu thermisch inert, was durch die konstante Masse (TG-Kurve) und das gleichbleibende Reaktionsverhalten (DTA-Kurve) charakterisiert wird.

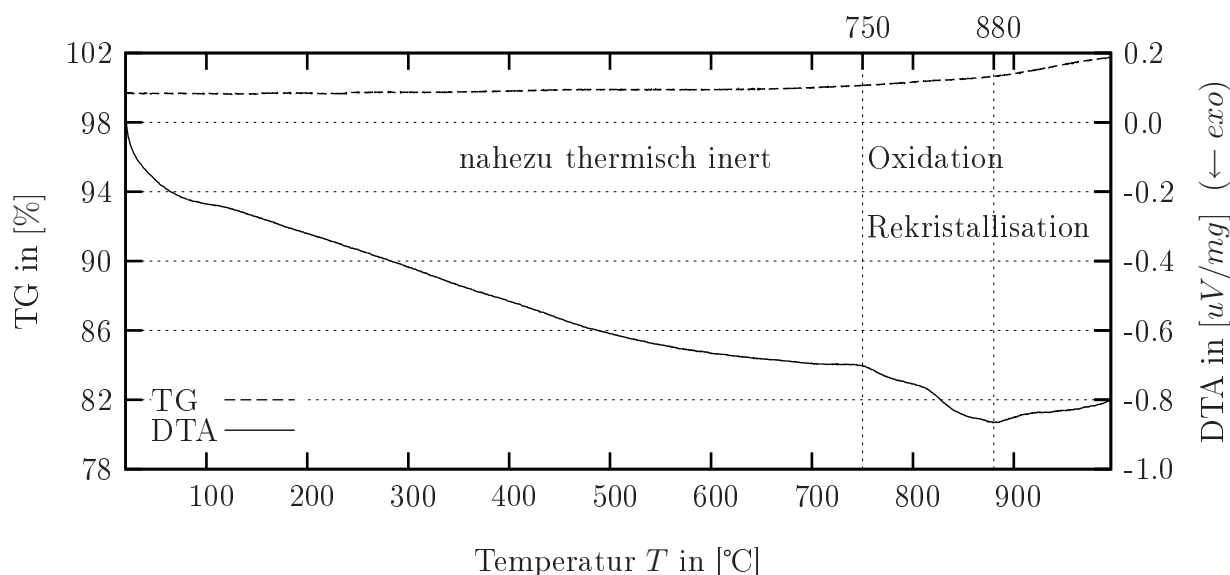


Bild 7.6: Thermische Analyse des Hüttensandmehls mit TG und DTA

Oberhalb von 750°C kann eine Massezunahme festgestellt werden. Im allgemeinen treten Massezunahmen bei Oxidationen auf, wobei thermische Energie an die Umgebung abgegeben wird. Die hier aufgezeichnete Massezunahme ist wahrscheinlich auf die Oxidation von metallischen Bestandteilen des Hüttensandes zurückzuführen, was auch die exotherme Reaktion bis 880°C stützt. Diese Oxidation setzt sich wahrscheinlich auch bei höheren Temperaturen fort, wird hier jedoch durch einen weiteren Effekt überlagert.

Hüttensande entstehen durch eine sehr rasche Abkühlung von Hochhofenschmelzen, so dass keine ausgeprägte Kristallisation während des Abkühlvorganges der Schlackenschmelze erfolgen kann. Die glasartig erstarrte Schlacke kann als unterkühlte, eingefrorene Schmelze angesehen werden [56]. Im Temperaturbereich von etwa 825°C bis 950°C setzt daher eine Rekristallisation der thermisch metastabilen, amorphen Zustandsform des Hüttensandes ein.

Das Bild 7.7 zeigt die thermische Analyse des bei 40°C vorgetrockneten Tonmehls. Die Deutung von Tonen vermischt mit Mineralgemischen erwies sich als sehr schwierig, da

thermische Umwandlungen der einzelnen Minerale selbst und Reaktionen zwischen den verschiedenen Mineralarten eines Tones auftreten können. Da Reaktionen verschiedener Minerale untereinander erst in Schmelzphasen, meist oberhalb von 1000°C , auftreten, können diese aufgrund des gewählten Temperaturbereiches vernachlässigt werden. Da in Tonen Wasser sowohl physikalisch als auch chemisch gebunden ist, treten verschiedene Entwässerungsstufen auf. Im hier untersuchten Tonmehl findet eine erste Entwässerung zwischen 50°C und 150°C statt. Die Abspaltung dieses, an den Tonoberflächen im Porenraum physikalisch gebundene Wassers, läuft in einer endothermen Reaktion ab. Weiteres Zwischenschichtenwasser wird durch Abspaltung von Hydroxidgruppen im Bereich von 500°C freigesetzt, wie sie für Kaolinit typisch sind [53]. In der DTA-Kurve ist in diesem Temperaturbereich eine leichte endotherme Wölbung zu erkennen. Von etwa 600°C bis 770°C wird sowohl das restliche Schichtenwasser durch Dehydratation der Alumosilikathydrate der Smectite freigesetzt, als auch das im Ton enthaltenen Calcit (CaCO_3) zersetzt.

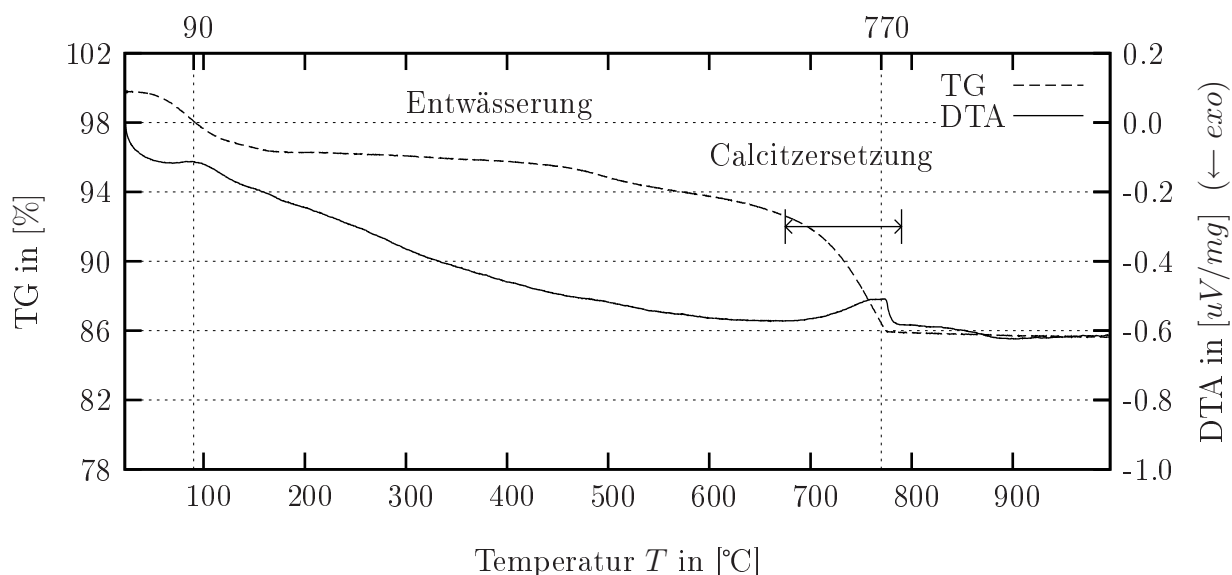


Bild 7.7: Thermische Analyse des Tonmehls TA mit TG und DTA

Aufgrund des in Tabelle 6.4 dargestellten mineralogischen Eisengehaltes könnten eventuell Sinterprozesse schon ab etwa 900°C im Ton ausgelöst werden, was aus der leichten endothermen Tendenz der DTA-Kurve geschlussfolgert werden kann.

7.2.3 Untersuchung von Gemischkombinationen

Die in Abschnitt 7.2.2 dargestellten thermischen Analysen der Einzelkomponenten sollen im Folgenden zur Deutung der Reaktionsmechanismen der Gemischkombinationen dienen. Da die Bildung von Hydratationsprodukten der Calciumsilikate und Calciumaluminat nicht spontan einsetzt, wurden die thermischen Analysen zu verschiedenen Zeitpunkten ausgeführt. Diese Zeitvarianz ermöglicht es, den Reaktionsfortschritt zu erfassen.

In Bild 7.8 ist die thermische Analyse der Baustoffrezeptur 0, bestehend aus zwei Teilen Hüttensandmehl und einem Teil Kalk, dargestellt. Die aufgenommenen Kurven geben das

thermische Reaktionsverhalten dieser Baustoffkombination eine Stunde nach Probenherstellung und nach 28 Tagen wieder.

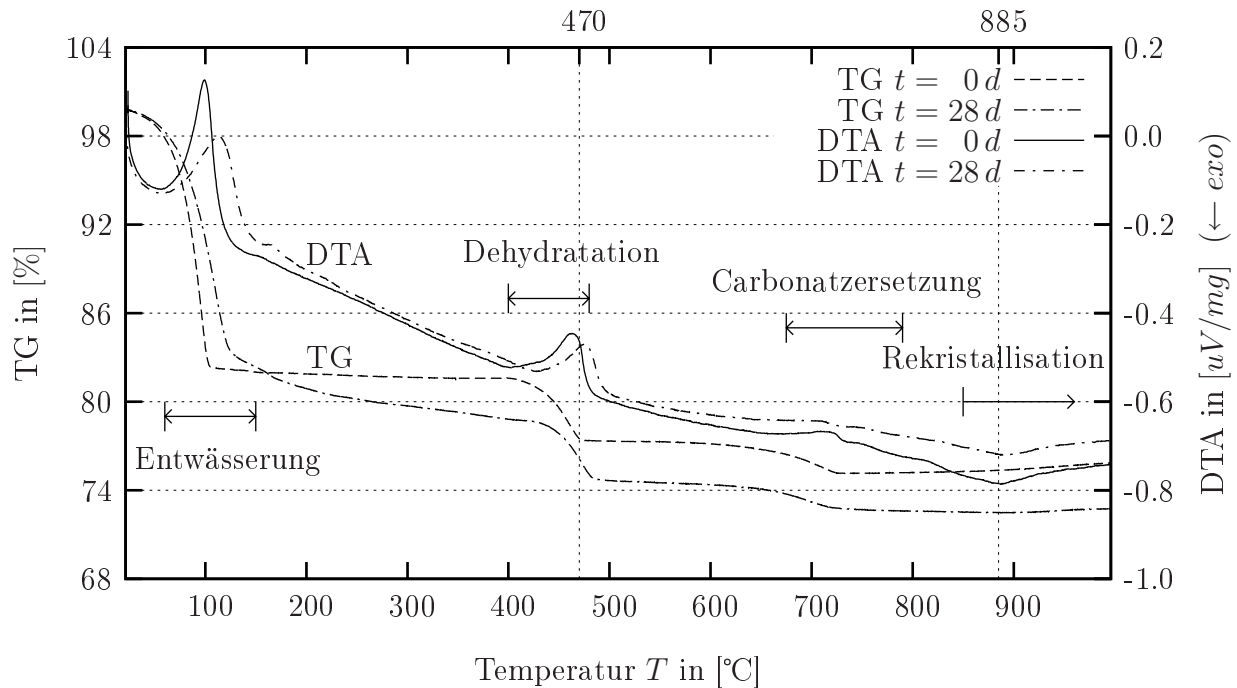


Bild 7.8: Thermische Analyse der Baustoffrezeptur 0 (HSM + CL80) mit TG und DTA 1 Stunde nach Probenherstellung und nach 28 Tagen

Direkt nach der Probenherstellung entspricht die thermogravimetrische und die differenzthermoanalytische Kurve einer Superposition der entsprechenden Kurven der Einzelkomponenten der Bilder 7.5 und 7.6. Das Anmachwasser wird in einer starken endothermen Reaktion bei 100°C (Verdampfen) aus dem Baustoffgemisch ausgetrieben. Hiernach besteht eine Massekonstanz bis zum Einsetzen der Dehydratation des Portlandits bei etwa 400°C. Im Weiteren folgt entsprechend den Einzelkomponenten die Entsäuerung des Kalkes im Temperaturbereich zwischen 650°C und 750°C sowie die Oxidation metallischer Spuren und die Rekristallisation des Hüttensandes ab 850°C, verbunden mit einer leichten Massezunahme in diesem Hochtemperaturbereich. Reaktionsprodukte der beiden Komponenten können zu diesem Zeitpunkt nicht nachgewiesen werden.

Die thermische Analyse nach 28 Tagen weist im Vergleich zum Herstellungszeitpunkt charakteristische Unterschiede auf. Da die Einzelkomponenten im Wesentlichen aus Calcium- und Silicium-Komponenten bestehen, werden in Verbindung mit dem Anmachwasser CSH-Phasen gebildet. Dass diese Hydratationsprodukte zur Festigkeitssteigerung beitragen, wurde bereits in Abschnitt 7.1 nachgewiesen. Je nach Art der gebildeten Phasenverbindung läuft die Dehydratation in unterschiedlichen Temperaturbereichen ab. Das physikalisch gebundene Wasser wird in einer endothermen Reaktion bei 115°C verdampft. Diese Verschiebung in den höhertemperierten Bereich kann durch die Ausbildung eines Mikroporensystems hervorgerufen werden. Ab einer Temperatur von 200°C bis 400°C setzt, im Gegensatz zum Herstellungszeitpunkt, eine deutliche Masseabnahme ein. Der Grund hierfür liegt in der Freisetzung von stärker physikalisch gebundenem Wasser sowie dem Zerfall von gebildeten CSH-Verbindungen. Zusätzlich wird die leichte Massezunahme ab

725°C durch eine, in der Größenordnung ähnliche, Masseabnahme kompensiert. Es ist anzunehmen, dass dieser Effekt durch den Zerfall von zementartigen CSH-Gelen, unter Bildung von β -C₂S, im Bereich von ungefähr 750°C zurückzuführen ist. Die nach 28 Tagen verminderte exotherme Reaktion im Bereich von 800°C bis 950°C belegt den Verbrauch des Hüttensandes bei der Bildung dieser CSH-Phasen.

Das Bild 7.9 zeigt die thermische Analyse der Baustoffrezepturen 3 und 3a. Diese bestehen aus Kalk, Hüttensand, Normsand und Wasser, sowie Tonmehl in der Rezeptur 3a. Die Masseanteile sind der Tabelle 7.1 zu entnehmen.

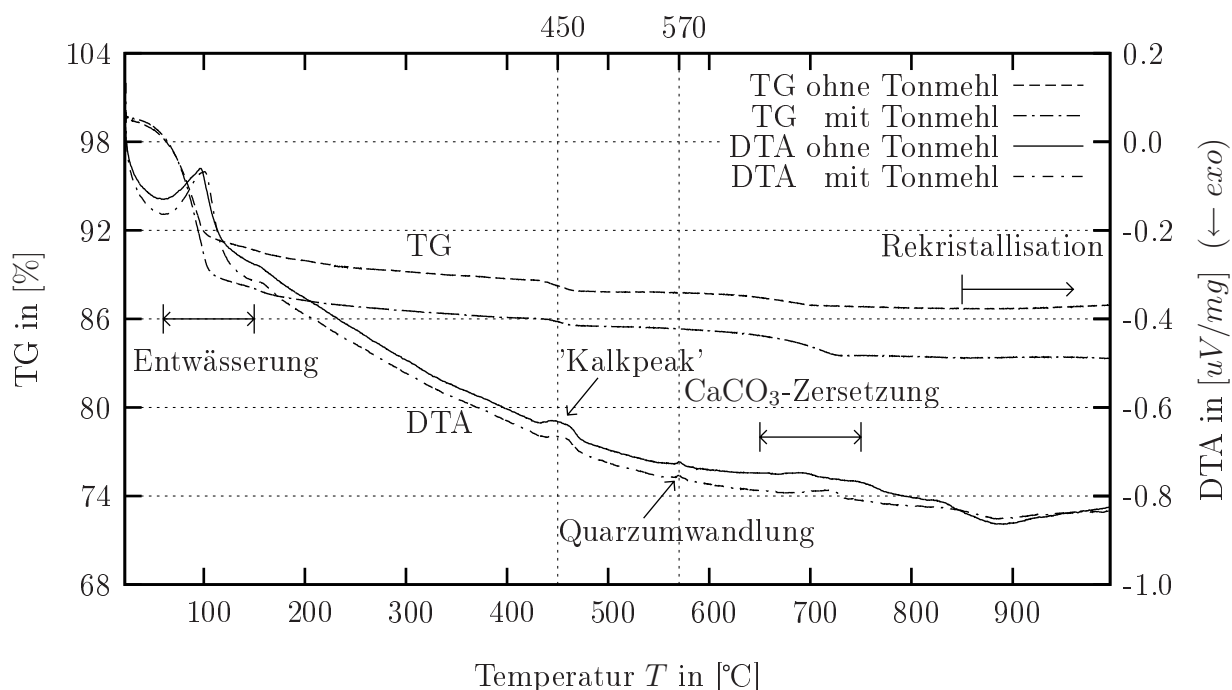


Bild 7.9: Thermische Analyse der Baustoffrezepturen 3 und 3a mit TG und DTA zum Prüfzeitpunkt nach 28 Tagen

Die TG-Kurven und DTA-Kurven beider Rezepturen verhalten sich bis etwa 600°C identisch. Die hierin auftretende prozentuale Massedifferenz ist auf unterschiedliche Anmachwassermengen zurückzuführen. Die maximale Dehydratation des Portlandzements ist wiederum im Bereich von 450°C abzulesen. Aufgrund des verwendeten Normsand ist eine Umwandlung von α -Quarz in β -Quarz bei 573°C zu registrieren.

Sichtbare Unterschiede sind ab etwa 700°C, sowohl in den TG-Kurven als auch in den DTA-Kurven sichtbar. Aufgrund des Tonanteils in der Rezeptur 3a tritt eine weitergehende Entwässerung und Calcitersetzung bis 725°C auf. Während bei dieser Rezeptur keine besondere Reaktionskinetik im anschließenden Bereich bis 800°C erkennbar ist, kann für die Rezeptur 3 eine endotherme Reaktion bei 750°C in der DTA-Kurve festgestellt werden. Dies deutet auf eine stärkere CSH-Zersetzung hin, was durch die erhöhten Druckfestigkeiten der Rezeptur 3 gegenüber der Rezeptur 3a bestätigt wird. Die DTA-Abweichungen ab 800°C sind auf die unterschiedlichen Hüttensandmehlanteile zurückzuführen, da die Rezeptur 3 in diesem Bereich ein ähnliches Verhalten wie die Baustoffrezeptur 0 aufweist. In Anbetracht dieser Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass das Hüttensandmehl eine schnelle Bildung von festigkeitssteigernden CSH-Verbindungen fördert.

In Bild 7.10 ist die thermische Analyse von verfestigtem Erdstoff mit einem HSM-Anteil von 12 M.-% und einem CL80-Anteil von 6 M.-% dargestellt. Die aufgenommenen Kurven geben das thermische Reaktionsverhalten dieses behandelten Erdstoffs eine Stunde nach der Kalkzugabe und nach 28 Tagen wieder. Die Lagerungsbedingungen entsprachen hierbei den Versuchsbedingungen ohne Frost-Tau-Wechsel nach Abschnitt 6.1.2.

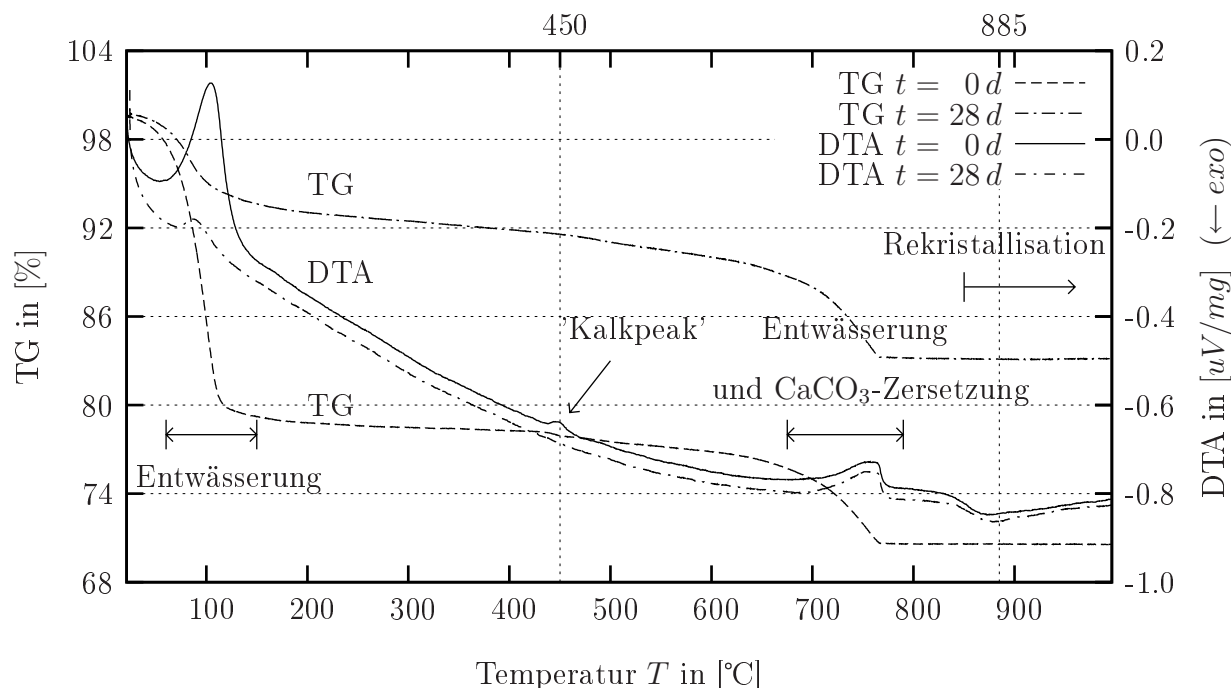


Bild 7.10: Thermische Analyse des verfestigten Erdstoffs (HSM/CL80 = 12/6 M. - %) mit TG und DTA 1 Stunde nach Probenherstellung und nach 28 Tagen

Ungeachtet der großen Differenz an freiem Wasser in der ersten Stufe der Entwässerung, belegt das Bild 7.10 den chemischen Einbau von Wasser und Kalk in den Erdstoff. In der Phase der Softreaktionen kann in der Probe unverbrauchtes Kalkhydrat nachgewiesen werden. In der DTA-Kurve wird dies durch die gekennzeichnete endotherme Reaktion bei 450°C sichtbar. Ein Nachweis des Löschkalkes ist nach 28 Tagen nicht mehr möglich, da Reaktionen zwischen dem in der Bodenlösung dissoziiertem Kalk und den Tonmineralen des Erdstoffs sowie den Hydraulefaktoren des Hüttensandmehls zu Phasenumbildungen geführt haben. In den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2.1 wurden diese Wirkungsmechanismen ausführlich dargestellt.

Tabelle 7.3: Prozentuale Masse des verfestigten Erdstoffs bei thermischer Behandlung

Zeitpunkt t in [d]	Prozentuale Masse des verfestigten Erdstoffs m in [%]					
	200°C	450°C	Δm	450°C	800°C	Δm
0	78,80	77,93	-0,87	77,93	70,58	-7,35
28	93,04	91,57	-1,47	91,57	83,18	-8,39

Die Tabelle 7.3 enthält die prozentuale Masseabnahme des verfestigten Erdstoffs für zwei ausgewählte Temperaturbereiche. Im ersten Temperaturbereich bis 450°C sind die Entwässerung von stärker physikalisch gebundenem Wasser sowie der Zerfall von natürlichen und

gebildeten CSH-Verbindungen angesiedelt. Der zweite Temperaturbereich bis 800°C umfasst die Calcitersetzung, die vollständige Entwässerung der Tonzwischenschichten durch Abspaltung von Hydroxidgruppen sowie den Zerfall von weiteren festigkeitssteigernden CSH-Phasen. Obwohl die erste Stufe der Entwässerung belegt, dass die Probe nach 28 Tagen wesentlich weniger Ausgangsfeuchte als zum Herstellungszeitpunkt aufweist, ist der prozentuale Masseverlust in beiden Temperaturbereichen höher als zum Herstellungszeitpunkt. Da beide Proben der selben Mischung entstammen, muss Wasser zusätzlich chemisch gebunden worden sein. Im Temperaturbereich von 450°C bis 800°C beträgt dieser Masseverlustdifferenz zwischen den Proben etwa 1 Prozent. Diese Abweichung kann der Dehydratation von zusätzlich gebildeten CSH-Verbindungen des Gel- und Neolith-Stadium zugeschrieben werden.

7.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Zum visuellen Nachweis der kristallinen Neubildung von Calciumsilikat- und Calciumaluminathydraten wurden Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (REM-Aufnahmen) von den verfestigten Erdstoffgemischen angefertigt. Die Präparation der Proben beinhaltete eine Vakuumtrocknung mit anschließender Goldbedampfung. Da Untersuchungen an polierten Schliffen nur eine ebene Darstellung der Gelmasse ermöglichen, sind zum Nachweis des Kristallwachstums Bruchflächen nach 15 sowie nach 30 Wochen untersucht worden.

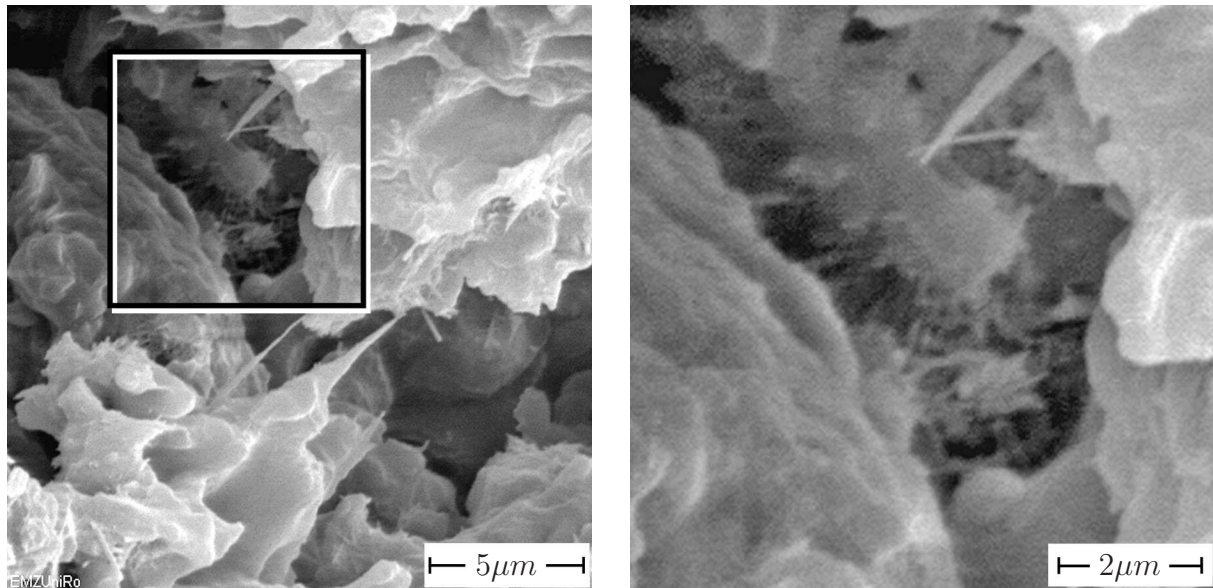


Bild 7.11: Einsetzende Verzahnung von nadelartigen Kristallen bei Proben ohne Frost-Tau-Wechsel nach 30-wöchiger Lagerung in luftdicht verschlossenen Gefäßen bei Raumtemperatur: Übersicht (links), Ausschnitt (rechts)

In Bild 7.11 (rechts) ist das einsetzende Wachstum von spitznadeligen Kristallen im Porenraum zu erkennen. Diese zahlreichen Verflechtungen bilden eine filzartige Struktur, die die Grundlage der Verfestigung des Erdstoffs darstellen.

Besonders ausgeprägtes Kristallwachstum konnte bei den, in Abschnitt 6.3.2.4 beschriebenen, wassergelagerten Probekörpern der Serie 5 beobachtet werden. Da bei dieser Serie die

maximalen E-Moduln auftraten, ist anzunehmen, dass ein schnelles Wachstum von den in Bild 7.12 dargestellten, auskristallisierten Vernadelungen zur Probensteifigkeit führen. Nicht nur die übergreifende Vernadelung zwischen den Tonpartikeln, sondern auch der im Bild 7.12 (links) oben sichtbare flächenhafte Überzug trägt zur Festigkeitsteigerung bei.

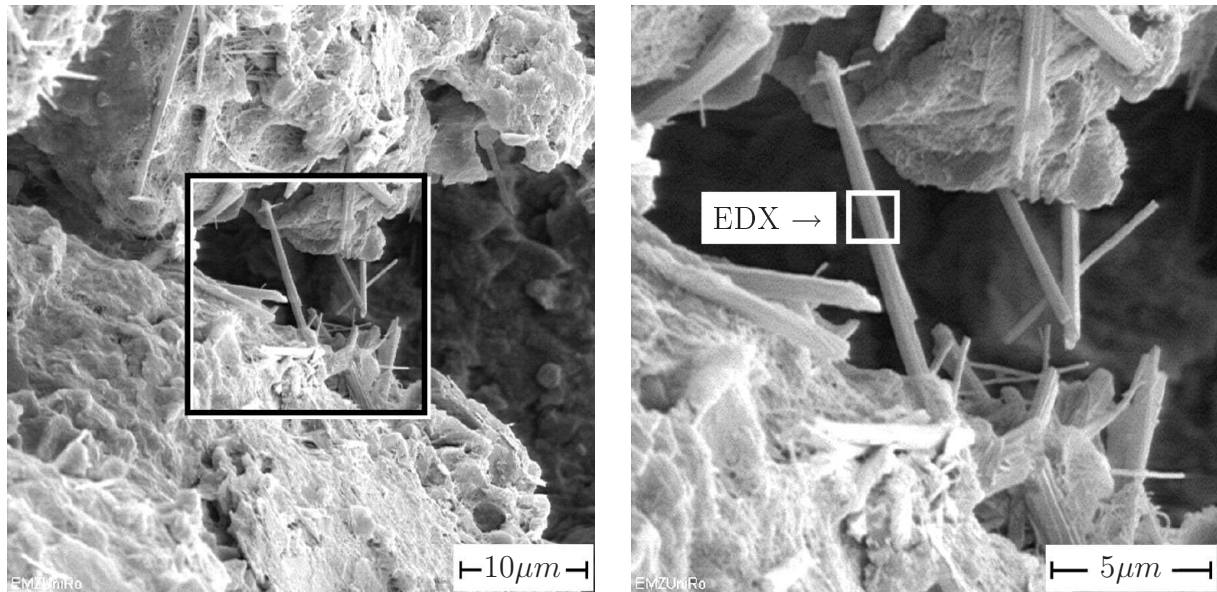


Bild 7.12: Fortschreitende Vernadelung von kristallinen CSAH-Phasen: Übersicht (links), Ausschnitt (rechts)

Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung dieser nadelartigen Kristalle wurden eine EDX-Analyse durchgeführt. In Bild 7.12 (rechts) ist der gewählte Untersuchungsausschnitt für die Kristallneubildung dargestellt. Die Ergebnisse sind dem Bild 7.13 zu entnehmen.

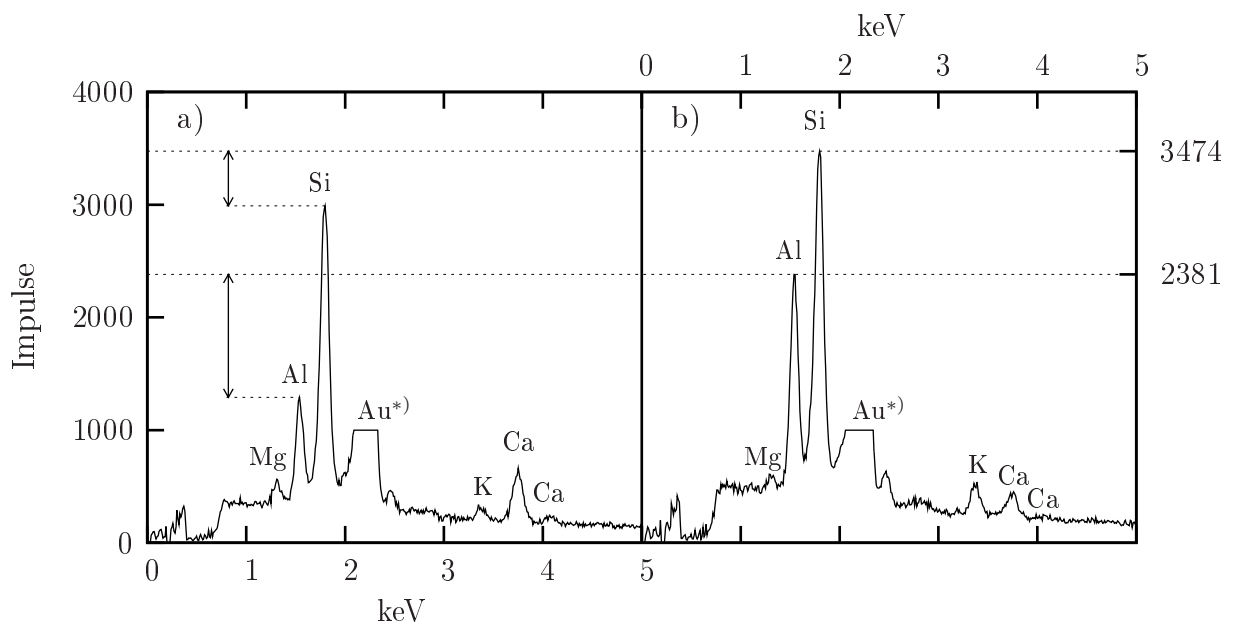


Bild 7.13: EDX-Analyse für Bereiche a) ohne und b) mit Kristallneubildung, Parameter: Beschl.-Spannung: 10 kV, Abnahmewinkel: 35° (*) Oberfläche mit Gold besputtert, Reflex entfernt)

Zum Vergleich enthält das Bild 7.13 a) auch eine EDX-Analyse von der angrenzenden, nicht kristallinen Struktur. Hiernach weisen die Kristallneubildungen im Bild 7.13 b) sowohl einen erhöhten Silicium- als auch einen erhöhten Aluminiumanteil gegenüber den kristallfreien Flächen auf. Auch in den Kristallneubildungen konnte Calcium nachgewiesen werden, sodass die Bildung von CSAH-Phasen bestätigt wird. Es ist wahrscheinlich, dass die geänderten Milieubedingungen infolge der Kalk- und Hüttensandzugabe sowie die Reaktionsfähigkeit dieser Stoffe mit den Tonmineralen, die gezeigte Kristallisation unterstützen und beschleunigen.

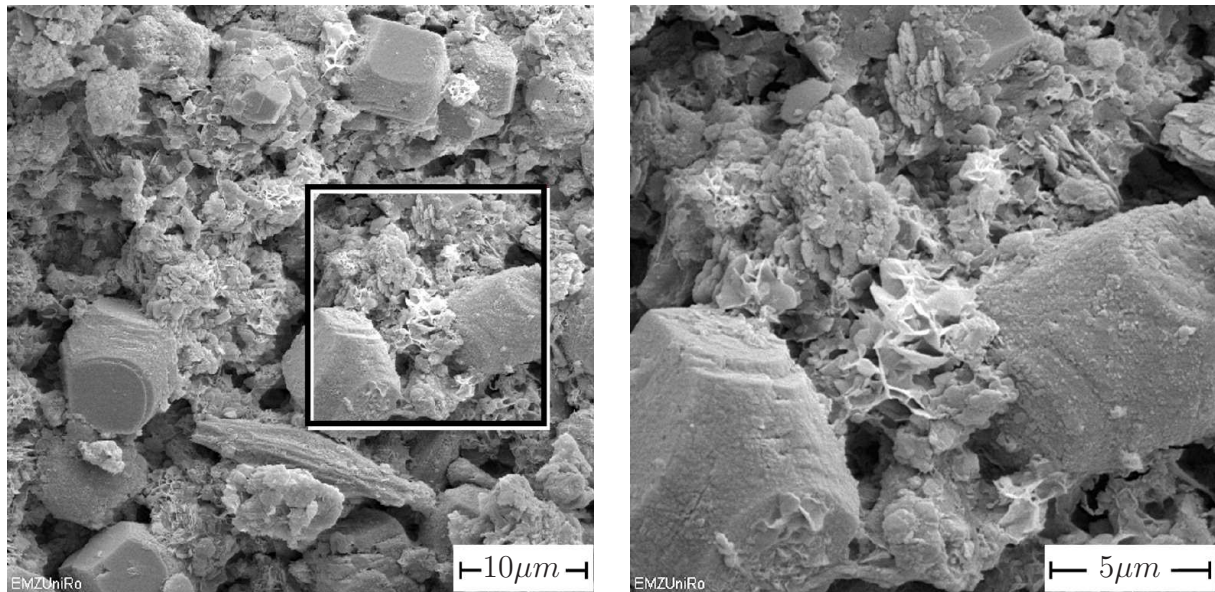


Bild 7.14: Überwachungen von Hüttensandmehlbestandteilen durch blättchenförmige CSAH-Phasen

In Bild 7.14 ist das Wachstum von authigenen, smectitartigen Wabenstrukturen auf Quarz- oder Calcitkristallen des Hüttensandmehls zu erkennen. Die Ausprägung dieser blättchenförmigen Gebilde erinnert stark an die aus der Zementhydratation bekannten CSH- und CAH-Phasen. Da Illite/Smectite im Wesentlichen aus Aluminiumsilikathydraten bestehen, können sich durch die Calciumzugabe CSAH-Phasen bilden. Die dargestellten Überwachungen erhöhen den inneren Verbund und die Festigkeit des Erdstoffs. Die durchgeführten Frost-Tau-Wechsel bestätigten die Klimabeständigkeit dieser neuen Verbindungen.

7.4 Röntgendiffraktometrie

7.4.1 Grundlagen

Mit der Röntgendiffraktometrie lassen sich zerstörungsfreie Analysen an Volumenkristallen, an dünnen Schichten sowie an Grenz- und Oberflächen durchführen. Das physikalische Prinzip beruht auf der Beugung und Interferenz von Röntgenstrahlung an periodisch angeordneten Gitteratomen, deren interatomaren Abstände im Bereich von 1 bis 3 Å liegen. Wird Materie Röntgenstrahlung ausgesetzt, dessen Wellenlänge λ der Größenordnung der

Atomabstände entspricht, so wirkt das Kristallgitter als dreidimensionales Beugungsgitter. Werden durch den einfallenden Röntgenstrahl Elektronen von regelmäßig angeordneten Gitteratomen zu periodischen Schwingungen angeregt, so senden diese kugelförmige Sekundärwellen mit gleicher Frequenz und Wellenlänge wie die Erregerstrahlung ab [39]. Hierdurch treten Interferenzen in allen Raumrichtungen auf, wobei Verstärkungen und Auslöschungen der Wellenintensität auftritt. Mit der *Braggschen* Reflexionsbedingung kann die Verstärkung der gebeugten Wellen anschaulich erklärt werden.

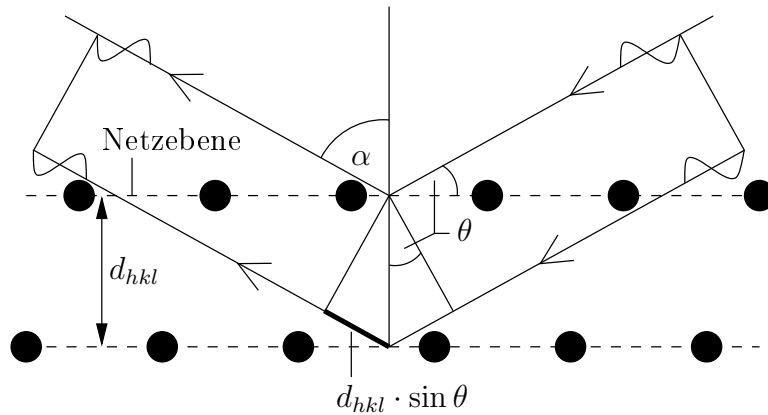


Bild 7.15: Phasenverschiebung bei Reflexion an parallelen Netzebenen

In Bild 7.15 besteht der Kristallaufbau aus gleichwertigen parallelen Ebenen, die in einem konstantem Netzebenenabstand d angeordnet sind. Trifft ein Röntgenstrahl auf eine dieser Netzebenen, so kann die Beugung als Teilreflexion aufgefasst werden. An jeder tieferliegenden Netzebene tritt eine weitere Reflexion der Strahlung auf, sodass Überlagerungen dieser Wellen auftreten. Aus Bild 7.15 ist zu entnehmen, dass die Wegdifferenz zwischen dem an der ersten und zweiten Netzebene reflektierten Strahl $2 \cdot d \cdot \sin \theta$ beträgt. Somit können die reflektierten Wellen nur in Phase schwingen, wenn diese Wegdifferenz einem ganzzahligen Vielfachen n der Wellenlänge λ betragen. In Gleichung 7.4 ist die *Braggsche* Reflexionsbedingung angegeben.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta \quad (7.4)$$

Zur Bestimmung eines unbekannten Stoffes wird in der Röntgendiffraktometrie die Probe mit Röntgenstrahlung bekannter Wellenlänge bestrahlt und der Winkel θ eines Reflexe aufgezeichnet [1]. Hieraus lassen sich die Netzebenenabstände d_{hkl} nach Gleichung 7.4 berechnen. Mit Hilfe von Material-Datenbanken, in denen die Reflexintensität sowie die zugehörigen d_{hkl} -Werte enthalten sind, kann eine schnelle Identifizierung der Probe erfolgen.

7.4.2 Untersuchungen

Zum Nachweis von Phasenumbildungen wurden Texturpräparate des Erdstoffs, des verfestigten Erdstoffs sowie der Baustoffrezepturen des Abschnitts 7.2.3 spektroskopisch untersucht. Die Analysen wurden mit einem Röntgendiffraktometer Siemens D 5000 am Lehrstuhl für Werkstofftechnik der Universität Rostock durchgeführt. Zur Identifizierung der

Verbindungen wurden Datenbankeinträge des International Centre for Diffraction Data (ICDD) genutzt. Die zur Verfügung stehenden Powder Diffraction Files (PDF) resultieren aus dem Jahr 1992. In Bild 7.16 wird exemplarisch die Anwendung der Datenblätter demonstriert. Die dargestellte 2θ – Skalierung gilt für die Wellenlänge $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ der $K_{\alpha 1}$ -Strahlung der im Diffraktometer verwendeten Kupferanode.

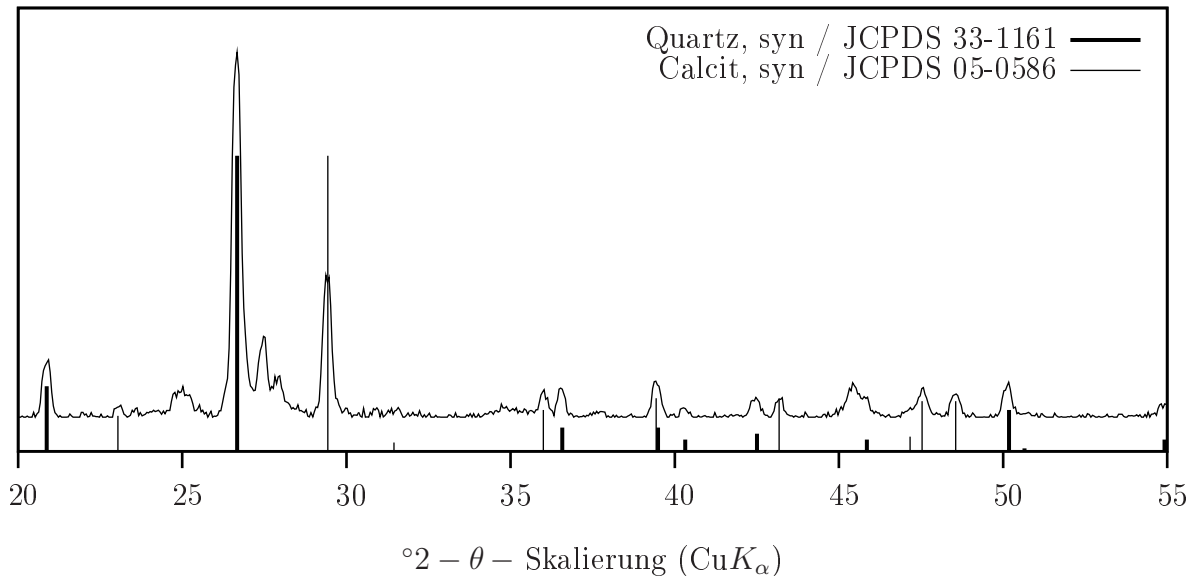


Bild 7.16: Identifizierung von Quartz und Calcit im Erdstoff mittels PDF-2 Set des ICDD

In Bild 7.17 sind die Ergebnisse der spektroskopischen Untersuchungen des Erdstoffs und der ausgehärteten Baustoffrezeptur 3a vergleichend gegenübergestellt.

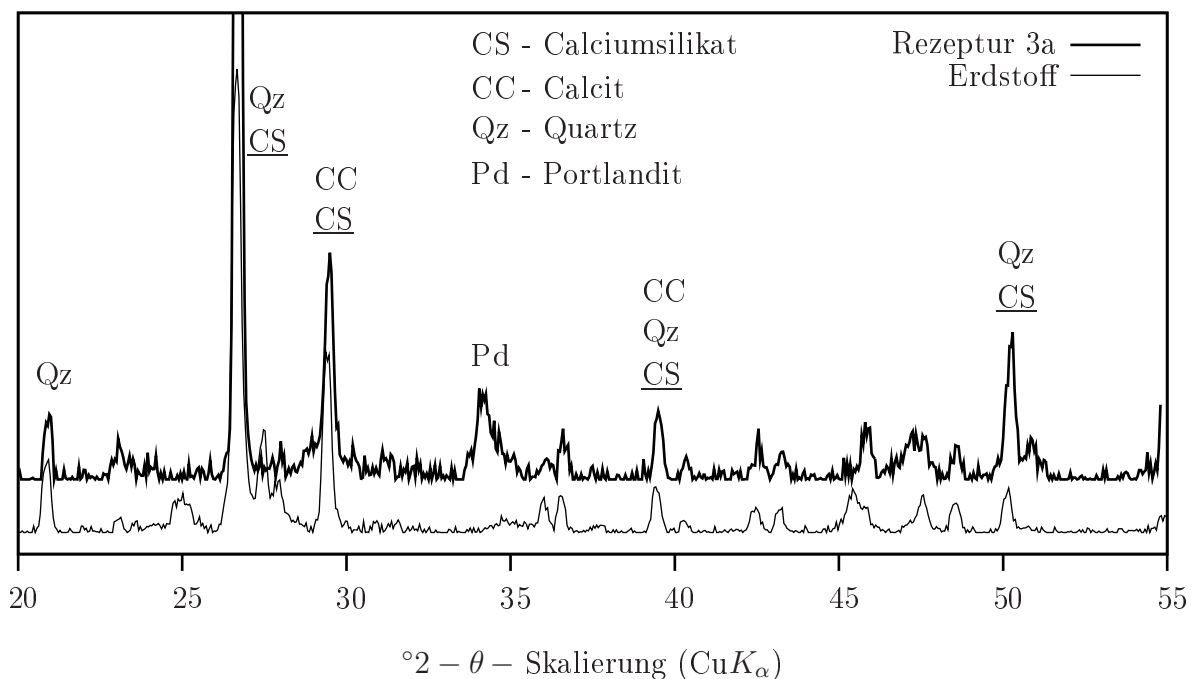


Bild 7.17: Vergleich der röntgenspektroskopischen Aufnahmen des Erdstoffs und der Baustoffrezeptur 3a

Aus der Reflexverteilung des Bildes 7.17 wird ersichtlich, dass die Baustoffrezeptur 3a die Zusammensetzung des Erdstoffs natürlich simuliert. Aufgrund der Korngröße und der kristallinen Struktur des Normsandcs in der Rezeptur ist eine Reaktion dieses Zuschlagmaterials mit dem Kalk kaum zu erwarten. Ein Vergleich der Reflexverteilungen verdeutlicht, dass schon im unbehandelten Erdstoff CS-Phasen enthalten sind. Aufgrund verschiedener Trocknungsstadien und auch fortschreitender Verfestigungsreaktionen ändern sich die Hydratphasen, sodass eine Unterscheidung zwischen CS und CSH des untersuchten Materials nicht vorgenommen werden kann und deshalb in Bild 7.17 zusammenfassend als CS deklariert ist. Neben dem zusätzlich enthaltenen Portlandit weist die Baustoffrezeptur 3a eine verstärkte Bildung von Calcium-Silicat-Verbindungen auf, die die hohen Festigkeiten bedingen. Mit diesen Erkenntnissen ist nachfolgend ein Vergleich zwischen dem Erdstoff und dem verfestigten Erdstoff möglich.

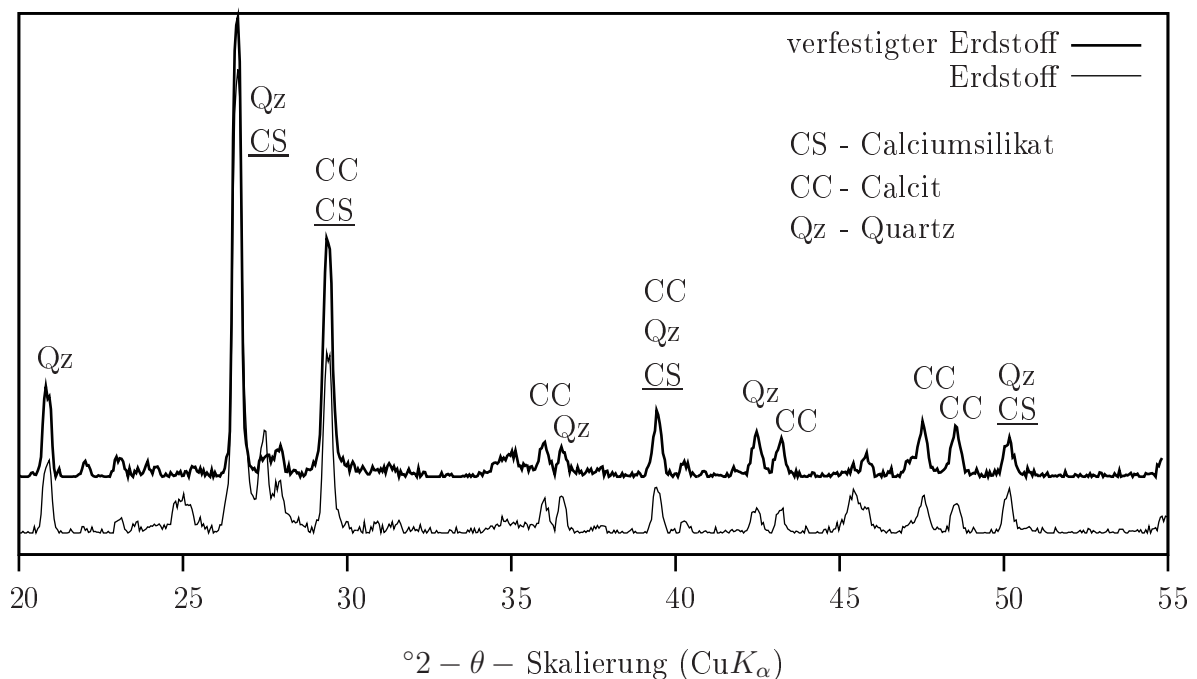


Bild 7.18: Vergleich der röntgenspektroskopischen Aufnahmen des Erdstoffs und des mit Kalk und Hüttensandmehl verfestigten Erdstoffs

In Bild 7.18 sind die Ergebnisse der spektroskopischen Untersuchungen des Erdstoffs und eines mit einem Kalk-Hüttensandmehl-Gemisch verfestigten Erdstoffs gegenübergestellt. Im Vergleich zur Baustoffrezeptur 3a fallen die Unterschiede deutlich geringer aus; es ist jedoch ebenfalls eine erhöhte Bildung von CSH-Phasen vorhanden. Phasenneubildungen beziehungsweise Verstärkungen werden unter anderem bei $29,5^{\circ} 2\theta$ und $39,5^{\circ} 2\theta$ sowie geringfügig bei $50,2^{\circ} 2\theta$ ersichtlich. Diese nachgewiesenen Phasenveränderungen bedingen die verbesserten bautechnisch relevanten Eigenschaften des behandelten Erdstoffs.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Nachweis von sich bildenden festigkeitssteigernden CSH- und auch CAH-Phasen durch die ergänzenden Untersuchungsmethoden nachgewiesen werden konnte. Die Zugabe von Hüttensandmehl bei der Kalkbehandlung des Erdstoffs beschleunigt und verstärkt die ablaufenden Verfestigungsreaktionen.

Zusammenfassung

Kalkbehandelte bindige Erdstoffe weisen häufig nur einen Bruchteil der Anfangsfestigkeit von hydraulisch verfestigten nichtbindigen Erdstoffen auf. Um den stetig steigenden Verkehrsaufkommen und Achslasten gerecht zu werden, ist es notwendig, bindige Erdstoffe im Untergrund oder Unterbau von Verkehrswegen effektiver zu verfestigen. Hierbei gilt es nicht nur die Einbaufähigkeit und die Langzeitverfestigung dieser Erdstoffe zu gewährleisten, sondern vielmehr auch eine Beschleunigung der maßgebenden puzzolanischen Verfestigungsreaktionen zu erreichen. Durch Beimengungen von Zusatzstoffen können dabei einerseits die reaktionsfähigen Phasen im Erdstoff erhöht und andererseits die innere Reibung günstig beeinflusst werden.

Zur verstärkten Bildung von festigkeitssteigernden Calcium-Aluminat-Silikat-Hydratphasen werden in der vorliegenden Arbeit neben einer raumbeständigen, puzzolanisch reagierenden Steinkohleflugasche auch die Wirksamkeit eines latent-hydraulisch wirkenden Hüttensandes untersucht. Die markantesten Verbesserungen der Festigkeitseigenschaften des Erdstoffs werden beobachtet, wenn neben Kalkhydrat zusätzlich Hüttensand zugemischt wird. Um die Reaktion zwischen dem Kalk, dem Hüttensand und dem Erdstoff zu optimieren, wird ein feingemahlener Hüttensand verwendet, dessen Granulometrie im Schluffkornbereich liegt. Aufgrund der großen spezifischen Oberfläche werden die Reaktionen zwischen diesen Bestandteilen begünstigt. In Anbetracht dieser Ergebnisse konzentrieren sich die Untersuchungen vorwiegend auf Kalk-Hüttensandmehl-Erdstoff-Gemische, deren Festigkeiten weit oberhalb der klassischen Kalkstabilisierung liegen.

Die Verfestigungsneigung des untersuchten bindigen Erdstoffs bei Kalkzugabe wird in Eignungsprüfungen an Proctorkörpern nachgewiesen. Hierbei kann jedoch festgestellt werden, dass mit dieser Verdichtungsmethode erhebliche Dichteunterschiede in den Probekörpern entstehen, die die Festigkeit beeinflussen. Um diese Unzulänglichkeiten zu minimieren, wird die Herstellung der zylindrischen Probekörper durch Druckverdichtung untersucht. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass sich einerseits homogene Dichteverteilungen innerhalb der Probekörpern ausbilden und andererseits definierte Dichten reproduzierbar sind. Da sich die verwendete Herstellungstechnologie an die in-situ-Verdichtung anlehnt, ist von einer realitätsnahen Übertragbarkeit des bodenmechanischen Verhaltens zwischen Labor und Baustelle auszugehen.

Die Wirksamkeit der Erdstoffverfestigung mit gemahlenem Hüttensand und Kalk wird daraufhin an diesen druckverdichteten Probekörpern untersucht. Die Herstellung des Erdstoff-Kalk-Hüttensandgemisches umfasst zwei Teilschritte. Zunächst wird der mechanisch zerkleinerte Erdstoff mit Hüttensandmehl vermengt. Diese Anteile betragen 4, 8 und

12 Masseprozent bezogen auf die Erdstofftrockenmasse. Nach einer Verweildauer von 24 Stunden wird diesen Gemischen ein Kalkanteil von 2, 4 und 6 Masseprozent zugegeben. Diese Zugabemengen beziehen sich auf die Trockenmasse des Gemisches. Die Verfahrensweise entspricht hierbei den Technischen Prüfvorschriften für Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat nach [26]. Die Verdichtungsintensitäten und Wassergehalte der hergestellten Probekörper werden in Anlehnung an Proctorversuche mit Verdichtungsarbeiten von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ und $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ gewählt. Um den Einfluss der beigemengten Zusatzstoffe auf die bodenmechanischen Eigenschaften zu ermitteln, werden die Probekörper unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Praxisnahe Bedingungen werden durch die Lagerung im Laborklima, im Wasser und durch Frost-Tau-Wechsel simuliert.

Die durchgeführten Untersuchungen liefern die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse:

- Die Wirksamkeit auf die Verbesserung der bautechnisch relevanten Eigenschaften ist bei den verwendeten Erdstoff-Hüttensand-Kalk-Gemischen wesentlich ausgeprägter als für Erdstoff-Kalk-Gemische.
- Ein optimaler Wirkungsgrad wird für ein Mischungsverhältnis von zwei Anteilen Hüttensandmehl zu einem Teil Kalk erzielt, wenn der Kalkanteil zwischen 4 und 6 Masseprozent beträgt.
- Die Hüttensandmehlzugabe führt zu einer Verringerung der Plastizität und damit zur Verbesserung der Verdichtungswilligkeit beim Einbau in-situ.
- Nach Lagerung der Probekörper im Laborklima können Festigkeitszuwächse gegenüber Erdstoff-Kalk-Gemischen bis zu 60 Prozent verzeichnet werden.
- Die Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Gemische weisen im Vergleich zu Erdstoff-Kalk-Gemischen erhöhte Frostbeständigkeiten auf, sodass die Festigkeitseinbußen wesentlich geringer ausfallen. Der hauptsächliche Grund hierfür ist in den beschleunigten Verfestigungsreaktionen zu sehen.

Die aufgezeigten Verbesserungen des Erdstoffes durch den Einsatz von Hüttensandmehl-Kalk-Gemischen sind auf Reaktionen von festigkeitsbildenden Strukturen zurückzuführen. Neben den spontanen Reaktionen zwischen Kalk und dem latent-hydraulisch wirkenden Hüttensandmehl wird auch durch die Anlagerung von Bestandteilen des nichtbindigen Hüttensandmehls an den Kontaktflächen der Tonminerale das Reaktionsvermögen dieser gegenüber dem Kalk erhöht. Hierdurch wird die Bildung von festigkeitsteigernden CSH-Gelen, CAH-Gelen und Kristallneubildungen begünstigt, welche mit thermoanalytischen, spektroskopischen und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen nachgewiesen wurden.

Durch die Zugabe von gemahlenem Hüttensand bei Kalkstabilisierungen können erhebliche Verbesserungen der baupraktisch relevanten Eigenschaften mit vertretbarem Aufwand erwartet werden. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse sollten daher unter Praxisbedingungen überprüft werden.

Literaturverzeichnis

- [1] *Allmann, R.*: Röntgenpulverdiffraktometrie, 2. Aufl., Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, Heidelberg, 2003
- [2] *Brand, W.*: Die Bodenstabilisierung mit Kalk, Sonderdruck Straße und Autobahn, Nr. 11, S. 426-432, 1958
- [3] *Brand, W.*: Der Einfluß von Kalziumhydroxid auf die Eigenschaften schluffiger Böden im Straßenbau, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1962
- [4] *Brand, W.*: Über die Verteilung der Tonminerale auf die verschiedenen Korngrößengruppen der Böden, Tonindustrie-Zeitung, Heft 10, 1962
- [5] *Brandl, H.*: Zusammenhänge zwischen den chemisch-physikalischen Eigenschaften stabilerter Böden, Straßen- und Tiefbau, Nr. 4, S. 287-300, 1971
- [6] *Bürger, W.*: Bodenverfestigung mit Kalk, Tiefbau, Nr. 10, S. 731-741, 1974
- [7] *Dachroth, W.*: Handbuch der Baugeologie und Geotechnik, 3. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 2002
- [8] *DIN EN 196 - T1*: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Ausgabe 05/2005
- [9] *DIN EN 196 - T3*: Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit, Ausgabe 05/2005
- [10] *DIN EN 459*: Baukalk - Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien, Ausgabe 02/2002
- [11] *DIN 1164*: Zement mit besonderen Eigenschaften - Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften, Ausgabe 08/2004
- [12] *DIN 1168*: Baugipse - Teil 1: Begriff, Sorten und Verwendung; Lieferung und Kennzeichnung, Ausgabe 01/1986
- [13] *DIN 18121*: Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben - Wassergehalt, Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung, Ausgabe 04/1998
- [14] *DIN 18122*: Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze, Ausgabe 07/1997

- [15] *DIN 18123*: Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben - Bestimmung der Kornverteilung, Ausgabe 11/1996
- [16] *DIN 18127*: Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben - Proctorversuch, Ausgabe 11/1997
- [17] *DIN 18132*: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens, Ausgabe 12/1995
- [18] *DIN 18136*: Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch, Ausgabe 11/2003
- [19] *DIN 18137*: Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 2: Triaxialversuch, Ausgabe 12/1990
- [20] *DIN 18196*: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Ausgabe 06/2006
- [21] *DIN 51005* Thermische Analyse (TA) - Begriffe, Ausgabe 08/2005
- [22] *DIN 51006* Thermische Analyse (TA) - Thermogravimetrie (TG) - Grundlagen, Ausgabe 07/2005
- [23] *DIN 51007* Thermische Analyse (TA); Differenzthermoanalyse (DTA); Grundlagen, Ausgabe 06/1994
- [24] *FGSV 551*: Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln - Ausgabe 1997, FGSV Verlag GmbH, Köln, 1997
- [25] *FGSV 591/B 11.1*: Eignungsprüfungen bei Bodenverbesserungen mit Zement - Ausgabe 1986, FGSV Verlag GmbH, Köln, 1986
- [26] *FGSV 591/B 11.5*: Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat - Ausgabe 1991, FGSV Verlag GmbH, Köln, 1991
- [27] *Floss, R.*: ZTVE - Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau, Kirschbaum Verlag GmbH, Fachverlag für Verkehr und Technik, Bonn, 1997
- [28] *Freudenberg, G.*: Die Stabilisierung mit Braunkohlenfilterasche (BFA) Espenhain - Ergebnisse labortechnischer Untersuchungen und eines großtechnischen Versuches, aus Probleme der Bodenstabilisierung im Wirtschaftswegebau, Wissenschaftlich-technische Informationen für das Meliorationswesen, Heft 4, VEB Ingenieurbüro für Melorationen beim Staatlichen Komitee für Melorationen, Bad Freienwalde, 1969
- [29] *Großmann, W.*: Die Kalkstabilisierung bindiger Erdstoffe, aus Erdstabilisierung, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1966
- [30] *Hilbig, H.*: Chemische Analytik Teil IV, Thermische Analyse (TGA, DTA, DSC), Skriptum zum Baustoffingenieurwesen der TU München, München, 2004

- [31] *Hölzer, W.:* Die Bodenverfestigung feinkörniger, bindiger Böden durch Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen - Untersuchungen an der Bodenfließgrenze, Dissertation Universität Heidelberg, Heidelberg, 2000
- [32] *Informationsschrift:* Bodenverbesserung / Bodenverfestigung mit Kalk - Ausgabe 2004, Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V., Köln, 2004
- [33] *Jessberger, H. L.:* Bodenverbesserung mit Kalk im Ingenieurbau, Forschungsbericht Nr. 3/92, Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V., Köln, 1992
- [34] *Jessberger, H. L.:* Grundlagen und Anwendung der Bodenstabilisierung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1967
- [35] *Karsten, R.:* Bauchemie - Handbuch für Studium und Praxis, 9.Aufl., Verlag C. F. Müller, Karlsruhe, 1992
- [36] *Kézdi, Á.:* Stabilisierte Erdstraßen, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1973
- [37] *Kirsch, K.; Sondermann, W.:* Kapitel Baugrundverbesserungen aus Grundbautaschenbuch Teil 2, 6. Aufl., Ernst & Sohn Verlag GmbH, Berlin, 2001
- [38] *Krass, K.:* Erfahrungen mit Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Erdbauwerken, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 932, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für Neue Wiss., Bremerhaven, 2006
- [39] *Krischner, H.:* Einführung in die Röntgenfeinstrukturanalyse, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1974
- [40] *Kühl, H.:* Zement-Chemie, Band 3., 3. Aufl., VEB Verlag Technik, Berlin, 1961
- [41] *Lagaly, G.; Köster, H. M.:* Tone und Tonminerale, aus Tonminerale und Tone - Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt, Steinkopff Verlag Darmstadt, Darmstadt, 1993
- [42] *Lagaly, G.* Reaktionen der Tonminerale, aus Tonminerale und Tone - Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt, Steinkopff Verlag Darmstadt, Darmstadt, 1993
- [43] *Liebig, E.; Althaus, E.:* Kaolinit und Montmorillonit als puzzolanische Komponenten in Kalkmörteln - unbehandelt und nach thermischer Aktivierung, Zement Kalk Gips International, Nr. 5, S. 282-292, 1997
- [44] *Lottmann, A.:* Tragfähigkeit und Frostepfindlichkeit von kalkbehandelten bindigen Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen, Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2003
- [45] *Müller-Vonmoos, M.:* Zur Kornfraktionierung tonreicher Sediment, Mineral. Petrogr. Mitt. 51, Schweiz, 1971

- [46] *Müller-Vonmoos, M.; Kohler, E. E.*: Geotechnik und Entsorgung, aus Tonminerale und Tone - Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt, Steinkopff Verlag Darmstadt, Darmstadt, 1993
- [47] *Neff, H. K.*: Der Wasseraufnahme-Versuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte, Bautechnik 65, S. 153-163, Verlag Ernst & Sohn für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 1988
- [48] *Prinz, H.*: Abriß der Ingenieurgeologie, 3. erw. Aufl., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1997
- [49] *Ryggol, W.*: Das System $\text{CaO} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSO}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ und seine Wechselwirkung mit den Tonmineralen der Böden, Dissertation, Universität Köln, 1987
- [50] *Schade, H.-W.*: Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Mischbindemitteln zur Bodenbehandlung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 939, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für Neue Wiss., Bremerhaven, 2006
- [51] *Schiele, E.; Berens, L. W.*: Kalk - Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1972
- [52] *Schubenz, D.*: Straßenbau heute, Heft 2 - Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln, 2. Aufl., Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990
- [53] *Schüller, K.-H.*: Keramik, aus Tonminerale und Tone - Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt, Steinkopff Verlag Darmstadt, Darmstadt, 1993
- [54] *Skempton, A. W.*: The colloidal activity of clays, Proc. International 3. Conference Soil Mechanics, S. 57-61, Zürich, 1953
- [55] *Smolczyk, U.; Hilmer, K.*: Kapitel Baugrundverbesserungen aus Grundbautaschenbuch Teil 2, 5. Aufl., Ernst & Sohn Verlag GmbH, Berlin, 1996
- [56] *Stark, J.; Wicht, B.*: Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff, Birkhäuser Verlag, Basel, 2000
- [57] *Stefanoff, G.*: Zur Bestimmung der Fließgrenze bindiger Böden, Bauplanung-Bautechnik, 12. Jg., Heft 8, 1958
- [58] *Széchy, K.*: Der Grundbau, Teil 1, Springer-Verlag, Wien, 1963
- [59] *Soos, P. von*: Eigenschaften von Böden und Fels - ihre Ermittlung im Labor, aus Grundbautaschenbuch Teil 1, 6. Aufl., Ernst & Sohn Verlag GmbH, Berlin, 2001
- [60] *Vosteen, B.*: Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Kalken - Ausführungsbeispiele und Langzeitbeobachtungen, Entwicklungen im Erdbau bei der Qualitätssicherung, Vorträge der FGSV-Tagung Erd- und Grundbau, FGSV C 7, Heft 7, 1995

- [61] *Weiss, A.*: Über äquimolaren Kationenaustausch bei niedrig geladenen Ionenaustauschern, Kolloid-Zeitschrift, Heft 1, 1958
- [62] *Wesche, K.*: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2: Beton, Mauerwerk, 3. Aufl., Bauverlag, Wiesbaden, Berlin, 1993
- [63] *Wichter, L.; Lottmann A.*: Einflüsse des Gebrauchsverhaltens kalkbehandelter frostempfindlicher Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen auf den frostsicheren Oberbau - Reduzierung der Oberbaudicke, Tiefbau, Heft 10, 2001
- [64] *Wichter, L.; Lottmann A.*: Bewertung der Frostempfindlichkeit von Bodenverbesserungen mit Kalk und Möglichkeiten zur Reduzierung der Oberbaudicke, Tiefbau, Heft 11, 2003
- [65] *Wichter, L.; Lottmann A.*: Das Gebrauchsverhalten von Bodenverbesserungen mit Kalk, Straße+Autobahn, Heft 11, 2004
- [66] *Wiehler, H.-G.*: Straßenbau - Konstruktion und Ausführung, 3. Aufl., Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 1995
- [67] *Winterkorn, H.; Aichhorn W.*: Grundlagen der Bodenstabilisierung im Straßen- und Wegebau, Selbstverlag der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen im Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Verein, Wien, 1960
- [68] *Wisotzki, E.*: Erfahrungen bei Laborversuchen zur Erdstoffstabilisierung, Rostocker Berichte aus dem Institut für Bauingenieurwesen, Heft 15, 2005
- [69] *Wisotzki, E.*: Modifizierte Probekörperherstellung für die Eignungsprüfung bei Bodenbehandlungen mit Kalk, Rostocker Berichte aus dem Institut für Bauingenieurwesen, Heft 16, 2006
- [70] *Witt, K. J.*: Zement-Kalk-Stabilisierung von Böden, Schriftenreihe Geotechnik der Bauhaus-Universität Weimar, Heft 5, 2002

Tabellenverzeichnis

2.1	Umfang der Prüfungen [26]	10
4.1	Aufbau und Bindungen der Tonminerale nach [59]	15
4.2	Mineralogische Verbindungen des Erdstoffs	18
4.3	Chemische Anforderungen an Kalk ^{a)} nach <i>DIN EN 459-1</i> (Auszug)	21
6.1	Parameter der Proctorkörperherstellung für einfache und doppelte Standardproctorarbeit	32
6.2	Aktivitätsgrenzen und typische Aktivitätszahlen bei mono-mineralischen Proben	46
6.3	Zusammenstellung wichtiger Kennzahlen zur Klassifizierung des Erdstoffs .	46
6.4	Mineralogische Bestandteile des Erdstoffs	48
6.5	Vergleich der Wassergehalte w und Trockendichten ϱ_d zwischen Proctorkörper und Kernkörper bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$	50
6.6	Festigkeitsvergleich der einaxialen Druckspannungen für einfache und doppelte Proctorarbeit	53
6.7	Versagensgrößen der Probekörper $K552 - K556$ (CL80-Anteil: 6% – Verdichtungsarbeit: $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$)	59
6.8	Untersuchte Erdstoff-Zusatzstoff-Bindemittelgemische	62
6.9	Parameter der Proctorherstellung mit Erdstoff-Kalk-Gemischen	62
6.10	Vergleich der maximalen einaxialen Druckfestigkeiten zwischen Erdstoff-Kalk- und Erdstoff-Kalk-Hüttensand-Gemischen	65
6.11	Proctorkennwerte der Erdstoff-Hüttensandmehl-Kalk-Gemische	67
6.12	Lagerungsbedingungen und Prüfzeitpunkte der Probekörper	71
6.13	Gewählte Parameter für das Druckverdichtungsverfahren	72
6.14	Prozentuale Massen und Höhen nach 28 Tagen bezogen auf die Ausgangswerte zum Herstellungszeitpunkt der Probekörper	76
6.15	E-Moduln in Abhängigkeit der Gemischkombination	80
6.16	Wassergehalt w und Trockenmasse m_d des Probekörpers $K341$ vor und nach der Lagerung im Klimaschrank	80

6.17	Plastizitätsänderung infolge Einmischen von Hüttensandmehl zum Erdstoff	88
7.1	Zusammensetzung der Prüfkörper	90
7.2	Biegezug- und Druckfestigkeiten der Prüfprismen nach 28 Tagen	91
7.3	Prozentuale Masse des verfestigten Erdstoffs bei thermischer Behandlung .	99

Bildverzeichnis

2.1	Einteilung der Baugrundverbesserungen	3
2.2	Systematik der Baugrundverbesserungen nach [55]	4
2.3	Verbindung der Festkörner bei den verschiedenen Stabilisierungen [36] . . .	5
2.4	Körnungsbereiche für Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen . . .	6
2.5	Mischgerät beim Baumischverfahren (mixed-in-place)	8
2.6	Verteilen des Bindemittels auf der vorbereiteten Oberfläche	8
2.7	Einmischen des Bindemittels und homogenisieren Gemisches	9
2.8	Verdichten des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches mit Schafffußwalzen	9
4.1	Bausteine der silicatischen Tonminerale	14
4.2	Tetraederschichten (T) und Oktaederschichten (O) in den Schichtsilikaten [41]	14
4.3	Variable Randladungen in Abhängigkeit des pH-Wertes. Anionenaustausch im sauren Bereich und Kationenaustausch im alkalischen Bereich [42] . . .	16
4.4	Abhängigkeit der Plastizität von der Teilchenanordnung bei intrakristallin nicht quellfähigen Tonen [46]	16
4.5	Abhängigkeit der Plastizität von der intrakristallinen Quellung [46]	17
4.6	Schema der elektrischen Doppelschicht um ein Mineralkorn [58]	17
4.7	Röntgenfeinstrukturanalyse / Beugungsdiagramm des Erdstoffs	18
4.8	Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Erdstoffs	19
4.9	Schema für Kalkarten nach <i>DIN EN 459-1</i> [10]	19
4.10	Übersicht der Kalk-Ton-Gesteine und ihrer industriellen Verwendung [56] .	20
4.11	Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Baukalks CL80	22
4.12	EDX-Analyse für Kalk CL80, Parameter: Beschl.-Spannung: 10 kV, Ab- nahmewinkel: 35° (*) Oberfläche mit Gold besputtert)	22
4.13	Hochofen nach <i>Regourd</i> aus <i>Stark & Wicht</i> [56]	23
4.14	EDX-Analyse für Hüttensandmehl, Parameter: Beschl.-Spannung: 10 kV, Abnahmewinkel: 35° (*) Oberfläche mit Gold besputtert)	24
4.15	Rasterelektronenmikroskopaufnahme des Hüttensandmehls (HSM)	24

5.1	Kationen-anlagerung, Kationenaustausch und intrakristalline Quellung der Tonminerale [29]	25
5.2	Äquimolarer Kationenaustausch der Calciumbrückenbindung bei aufweitbaren Tonkristallen mit geringer Ladungsdichte [29]	26
5.3	Wirkungsweise bei Bodenbehandlungen mit Kalk [66]	27
5.4	Entstehung der Reaktionsphasen bei Langzeitwirkung des Kalkes im Erdstoff [36]	28
5.5	Zusammensetzung der anorganischen Baubindemittel auf Kalk- Silicat- und Aluminatbasis [35] und Einordnung des verwendeten Hüttensandes	29
5.6	Vergleich der Körnungslinie des Hüttensandmehls (HSM) und des Erdstoffs	30
6.1	Flächige Bindemittelzugabe mit einem Sieb (links) und manuelles Mischen des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches (rechts)	31
6.2	Maschinelles Mischen des Erdstoff-Bindemittel-Gemisches (links) und Verdichtung im programmierbaren Proctorgerät (rechts)	32
6.3	Dreifach-Ausstechapparatur zur Gewinnung von 3 Probekörpern mit einem Durchmesser von $d = 35\text{ mm}$ aus dem Proctorkörper	33
6.4	Ausstechvorrichtung mit einem herausgenommenen Zylinder (links) und Ausstechvorgang aus dem Proctorkörper (rechts)	33
6.5	Schematische Bruchbilder bei einaxialen Druckversuchen	34
6.6	Probekörper mit den Abmessungen $h/d = 75/35\text{ mm}$ nach einaxialem Druckversuch: Scherbruch (links) und Spaltbruch (rechts)	35
6.7	Schematische Proctorhammerführung mit Überschneidungen (links) und Verdichtungszone im aufgeschnittenen Proctorkörper (rechts)	35
6.8	Probekörper mit sich einstellenden Bruchbildern infolge unterschiedlicher Dichtebereiche im Proctorkörper	36
6.9	Programmierter 24 stündiger Frost-Tau-Zyklus des Klimaschranks	37
6.10	Proctorkörper während des Frost-Tau-Wechsels: Frostphase (links) und Auftauphase auf wassergesättigter Filzmatte (rechts)	37
6.11	Anpassung des Schlankheitsgrades der Probekörper durch maschinelles Abdrehen auf $h/d = 120/60\text{ mm} = 2$	38
6.12	Zylinder-Stempel-Konstruktion zur Herstellung von Probekörpern mit den Maßen $h = 120\text{ mm}$ und $d = 60\text{ mm}$ (links) und Verdichtungs-vorgang durch Einpressen der Stempel (rechts)	39
6.13	Eigenentwickeltes Verdichtungsgerät mit Fallgewicht (links) und Detail Aufschlagstück mit Walkzähnen (rechts)	40
6.14	Wasseraufnahme der Proben während der Auftauphase (oben) und Probekörper nach Beendigung der Frost-Tau-Wechsel (unten) - herkömmliches Verfahren (links), neues Verfahren (rechts)	41

6.15	Einaxiale Druckfestigkeit q_u der Probekörper $K221 - 223$ nach 12 Frost-Tau-Wechseln	42
6.16	Masseverlauf der Probekörper $K221 - 223$ mit Frost-Tau-Wechseln	43
6.17	Körnungslinie des untersuchten Erdstoffs (MPA Braunschweig)	44
6.18	Bestimmung der Fließgrenze w_L mit dem Fließgrenzengerät nach <i>Casagrande</i>	45
6.19	Plastizitätsdiagramm nach <i>DIN 18196</i>	45
6.20	Konsistenzbalken nach <i>Atterberg</i>	46
6.21	Wasseraufnahmegerät nach <i>Enslin/Neff</i> [47]	47
6.22	Zeit-Wassergehalts-Diagramm des Erdstoffs	47
6.23	Proctorkurve des unbehandelten Erdstoffs bei einer ausgeführten Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$	49
6.24	Vergleich der Proctorkurven mit und ohne Reduzierung des Probendurchmessers bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$	50
6.25	Spannungs-Dehnungs-Linien des unbehandelten Erdstoffs in Abhängigkeit vom Wassergehalt w bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$	51
6.26	Proctorkurve des unbehandelten Erdstoffs bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$	52
6.27	Vergleich der Proctorkurven mit und ohne Reduzierung des Probendurchmessers bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Dichte ρ und Trockendichte ρ_d)	52
6.28	Spannungs-Dehnungs-Linien des unbehandelten Erdstoffs in Abhängigkeit vom Wassergehalt w bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$	54
6.29	Spannungs-Dehnungs-Linien des unbehandelten Erdstoffs in Abhängigkeit vom Wassergehalt w mit äquivalenten Einbaudichten ρ zur Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$	55
6.30	Wassergehaltsänderung infolge 6%-iger CL80-Zugabe zum Erdstoff	56
6.31	Temperaturänderung ΔT bei 6%-iger CL80-Zugabe zum Erdstoff nach einstündiger Reaktion	56
6.32	Dichte ρ des Erstoff-Kalk-Gemisches mit einem 6%-igem CL80-Anteil und einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Probekörper $K551 - 556$)	57
6.33	Trockendichte ρ_d des Erstoff-Kalk-Gemisches mit einem 6%-igem CL80-Anteil und einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$	57
6.34	Probekörper $K552 - 555$ (von links nach rechts) nach Anpassung des Schlankheitsgrades nach 28 Tagen (CL80-Anteil: 6% – Verdichtungsarbeit: $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$)	58
6.35	Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper $K552 - 555$ nach 28 Tagen mit einem Seitenverhältnis von $h/d = 120/60 \text{ mm}$ (CL80-Anteil: 6% – Verdichtungsarbeit: $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$)	59

6.36	Dichte ρ des Erstoff-Kalk-Gemisches mit einem 6%-igem CL80-Anteil und einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Probekörper $K501 - 506$)	60
6.37	Trockendichte ρ_d des Erstoff-Kalk-Gemisches mit einem 6%-igem CL80-Anteil und einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$	60
6.38	Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper $K502 - 506$ nach 28 Tagen mit einem Seitenverhältnis von $h/d = 120/60 \text{ mm}$ (CL80-Anteil: 6% – Verdichtungsarbeit: $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$)	61
6.39	Massen- und Höhenverlauf der Probekörper $K40 - 49$, mit einem 4-prozentigem Kalkanteil, während der Lagerung im Klimaschrank	63
6.40	Druckfestigkeit der Probekörper nach 28 Tagen mit 2-prozentigem Kalkanteil	63
6.41	Druckfestigkeit der Probekörper nach 28 Tagen mit 4-prozentigem Kalkanteil	64
6.42	Druckfestigkeit der Probekörper nach 28 Tagen mit 6-prozentigem Kalkanteil	64
6.43	Wassergehaltsänderung infolge CL80-Zugabe nach einstündiger Reaktion (Kalkmenge bezogen auf das Trockengewicht des Erstoff-Hüttensandmehl-Gemisches)	65
6.44	Wassergehaltsänderung infolge 6%-iger CL80-Zugabe nach einer Stunde . .	66
6.45	Temperaturänderung ΔT infolge CL80-Zugabe zum Erstoff-Hüttensand-Gemisch nach einstündiger Reaktion	67
6.46	Dichte im Proctorversuch bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Wassergehalt bezogen auf das Ausgangsgemisch)	68
6.47	Dichte im Proctorversuch bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Wassergehalt nach Bindemittelzugabe)	68
6.48	Dichte im Proctorversuch bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Wassergehalt bezogen auf das Ausgangsgemisch)	69
6.49	Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper nach 28 Tagen bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$	70
6.50	Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper nach 28 Tagen bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$	70
6.51	Proctorkurven für die Gemischkombination CL80/HSM= 6/12 M – % und Kennwerte von Probekörpern bei Herstellung im Druckverdichtungsverfahren	72
6.52	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 1)	73
6.53	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 1)	73
6.54	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 56 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 2)	74
6.55	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 56 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 2)	74

6.56	Vergleich der Druckfestigkeiten nach 28 und 56 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ bei der Gemischkombination CL80/HSM= 6/12 M.-%	75
6.57	Massen- und Höherverlauf der Gemischkombination CL80/HSM= 2/4 M.-% für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$	75
6.58	Probenoberfläche der Gemischkombination CL80/HSM=6/12% bei 28-tägiger (links) und bei 56-tägiger Lagerung im Klimaschrank (rechts) und einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$	76
6.59	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 3 - Frost-Tau-Wechsel nach 7 Tagen)	77
6.60	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 3 - Frost-Tau-Wechsel nach 7 Tagen)	77
6.61	Prozentualer Massenverlauf von Probekörpern während der Lagerung im Klimaschrank (Frost-Tau-Wechsel)	78
6.62	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 49 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 4 - Frost-Tau-Wechsel nach 28 Tagen)	79
6.63	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 49 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 4 - Frost-Tau-Wechsel nach 28 Tagen)	79
6.64	Prozentualer Massenverlauf der Probekörper $K341 - K343$ während der Lagerung im Klimaschrank (Frost-Tau-Wechsel)	80
6.65	Probekörper der Serie 4 nach 12 Frost-Tau-Wechseln	81
6.66	Probenoberfläche der Gemischkombination CL80/HSM=4/8% mit Frostbelastung nach 7 Tagen (links) und mit Frostbelastung nach 28 Tagen (rechts) und einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$	82
6.67	Probenoberfläche der Gemischkombination CL80/HSM=6/12% mit einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (links) und mit einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (rechts) bei Frostbelastung nach 7 Tagen	82
6.68	Draufsicht auf die Probekörper während der Lagerung in Wassertonnen	83
6.69	Farbliche Veränderungen der Probekörper in Abhängigkeit des Kalkgehaltes	83
6.70	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 5 - Wasserlagerung)	84
6.71	Spannungs-Dehnungs-Linien nach 28 Tagen für eine äquivalente Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (Serie 5 - Wasserlagerung)	84

6.72	Probenoberfläche der Gemischkombination CL80/HSM=4/8% bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ (links) und bei einer Verdichtungsarbeit von $W = 1,2 \text{ MNm/m}^3$ (rechts) (Wasserlagerung)	85
6.73	Fließgrenzengerät nach <i>Casagrande</i> (links) und Kegelgerät (rechts)	86
6.74	Veränderung der Plastizität in Ton- und Schluffböden bei der Zugabe von Kalk [7]	86
6.75	Plastizitätsdiagramm nach <i>DIN 18196</i> für Erdstoff-Kalk-Gemische und Erdstoff-HSM-Gemische	87
6.76	Plastizitätsdiagramm nach <i>DIN 18196</i> für die Erdstoff-HSM-Kalk-Gemische	87
6.77	Ausrollgrenze und Fließgrenze des Erdstoff-Kalk-Hüttensandmehl-Gemisches	88
7.1	Prüfung der Prismen im Biegezugversuch (links) und im Druckversuch (rechts)	90
7.2	Nachweis der Carbonatisierung durch Zugabe von Salzsäure; auf der Oberfläche des Prismas (links) und im Inneren des Prismas (rechts)	92
7.3	Schematische Darstellung einer Thermowaage-Einheit	93
7.4	Probenträgersystem für kombinierte TG/DTA-Untersuchungen	93
7.5	Thermische Analyse des Kalkhydrates CL80 mittels TG und DTA	94
7.6	Thermische Analyse des Hüttensandmehls mit TG und DTA	95
7.7	Thermische Analyse des Tonmehls TA mit TG und DTA	96
7.8	Thermische Analyse der Baustoffrezeptur 0 (HSM + CL80) mit TG und DTA 1 Stunde nach Probenherstellung und nach 28 Tagen	97
7.9	Thermische Analyse der Baustoffrezepturen 3 und 3a mit TG und DTA zum Prüfzeitpunkt nach 28 Tagen	98
7.10	Thermische Analyse des verfestigten Erdstoffs (HSM/CL80 = 12/6 M.-%) mit TG und DTA 1 Stunde nach Probenherstellung und nach 28 Tagen	99
7.11	Einsetzende Verzahnung von nadelartigen Kristallen bei Proben ohne Frost-Tau-Wechsel nach 30-wöchiger Lagerung in luftdicht verschlossenen Gefäßen bei Raumtemperatur: Übersicht (links), Ausschnitt (rechts)	100
7.12	Fortschreitende Vernadelung von kristallinen CSAH-Phasen: Übersicht (links), Ausschnitt (rechts)	101
7.13	EDX-Analyse für Bereiche a) ohne und b) mit Kristallneubildung, Parameter: Beschl.-Spannung: 10 kV, Abnahmewinkel: 35° (*) Oberfläche mit Gold besputtert, Reflex entfernt)	101
7.14	Überwachungen von Hüttensandmehlbestandteilen durch blättchenförmige CSAH-Phasen	102
7.15	Phasenverschiebung bei Reflexion an parallelen Netzebenen	103
7.16	Identifizierung von Quartz und Calcit im Erdstoff mittels PDF-2 Set des ICDD	104

7.17 Vergleich der röntgenspektroskopischen Aufnahmen des Erdstoffs und der Baustoffrezeptur 3a	104
7.18 Vergleich der röntgenspektroskopischen Aufnahmen des Erdstoffs und des mit Kalk und Hüttensandmehl verfestigten Erdstoffs	105